



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS DEPARTAMENTO DE FÍSICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM FÍSICA**

KEVIN CHAGAS BITTENCOURT

**O DESENVOLVIMENTO DA ELETRODINÂMICA COMO
UMA TEORIA DE AÇÃO À DISTÂNCIA**

**SEROPÉDICA
2023**

KEVIN CHAGAS BITTENCOURT

**O DESENVOLVIMENTO DA ELETRODINÂMICA COMO UMA
TEORIA DE AÇÃO À DISTÂNCIA**

Monografia apresentada ao curso de Graduação em Física da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Campus Seropédica, como requisito para obtenção do título de Licenciado em Física.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Maia Porto

**SEROPÉDICA
2023**

AGRADECIMENTOS

A Deus, a quem ofereço este trabalho, por ter me criado, preservado e por me guiar e inspirar pelo Espírito Santo em todos os momentos.

Ao meu caríssimo orientador, o Prof. Cláudio, pela sabedoria, dedicação e paciência, e por todo apoio e conselhos que me deu desde o início da minha graduação.

A todos os professores e técnicos por seu trabalho árduo e incessante para o nosso desenvolvimento e aprendizado.

A todos os autores do campo da história da física, em especial ao Prof. André K. T. Assis por sua vasta e importantíssima contribuição. Sem ela, talvez o presente trabalho não fosse possível.

RESUMO.....	3
INTRODUÇÃO.....	4
1 - A ELETRICIDADE E O MAGNETISMO NO SÉCULO XVIII.....	6
2 - AS PRIMEIRAS NOÇÕES DE CORRENTE ELÉTRICA.....	17
3 - AS CONTRIBUIÇÕES DE AMPÈRE À ELETRODINÂMICA.....	24
4 - A LEI ELÉTRICA UNIVERSAL DE WEBER.....	34
4.1 - As contribuições de Fechner.....	34
4.2 - Hipóteses iniciais de Weber.....	36
4.3 - Dependência das velocidades das massas elétricas.....	49
4.4 - Dependência das acelerações das massas elétricas.....	56
4.5 - Indução de corrente elétrica.....	62
4.6 - Recepção pela comunidade científica.....	69
CONCLUSÃO.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

RESUMO

As teorias eletromagnéticas baseadas em campos são amplamente utilizadas nos dias atuais e muito bem sucedidas. Por conta disso, muito pouco é falado a respeito das teorias precedentes baseadas em ação à distância. Este trabalho de monografia explora as teorias eletrodinâmicas de ação à distância que surgiram nos séculos XVIII e XIX, antes da predominância das teorias baseadas em campos. O estudo aborda as teorias de fluidos elétricos e magnéticos de Du Fay e Franklin, a eletrostática de Coulomb, as primeiras concepções de corrente elétrica, com a invenção da pilha de Volta, a descoberta dos fenômenos eletromagnéticos por Ørsted, a teoria eletrodinâmica de Ampère e sua concepção das correntes elétricas e apresenta um resumo completo do desenvolvimento da lei de Weber da eletrodinâmica.

INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, o eletromagnetismo clássico, um dos pilares de toda a física, encontra sua máxima realização por meio dos trabalhos de cientistas do século XX, como Lorentz, e fundamentados nas teorias de campos de Maxwell e Faraday. Para aqueles que iniciaram o estudo da física nas últimas décadas, a ideia de explicar essa classe de fenômenos a partir dos campos elétrico e magnético parece natural e, às vezes, até óbvia.

No entanto, as teorias baseadas em campos nem sempre foram as predominantes. A sugestão da mecânica newtoniana da força gravitacional como ação à distância teve impacto significativo em físicos dos séculos XVIII e XIX, como Coulomb, Ampère e Weber, que desenvolveram teorias elétricas baseadas na ação à distância.

Este trabalho se propõe a apresentar as principais teorias eletrodinâmicas de ação à distância que se desenvolveram ao longo dos séculos XVIII e XIX, o contexto epistemológico nas quais estavam inseridas, suas hipóteses e concepções de eletricidade, bem como apresentar um resumo do desenvolvimento de Weber de uma lei de ação à distância que foi capaz de explicar diversos fenômenos eletromagnéticos que normalmente são explicados com uma abordagem de campos.

No primeiro capítulo, trataremos das teorias de fluidos elétricos e magnéticos e suas origens e do desenvolvimento da eletrostática de Coulomb. No capítulo seguinte, veremos as primeiras percepções acerca da corrente elétrica, possibilitadas pela invenção da pilha de Volta e a descoberta dos fenômenos eletromagnéticos por Ørsted. No terceiro capítulo, apresentaremos

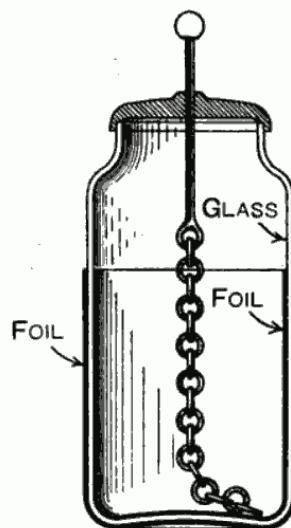
a teoria unificadora de Ampère, sua concepção de corrente elétrica e sua lei de força eletrodinâmica de ação à distância. Por fim, no último capítulo, apresentaremos um resumo do desenvolvimento completo da lei eletrodinâmica de Weber e algumas considerações sobre suas consequências.

1 - A ELETRICIDADE E O MAGNETISMO NO SÉCULO XVIII

Ao longo do século XVIII, uma nova e promissora área da física vinha sendo desenvolvida: a eletricidade. Acompanhando o espírito da época, vários estudos experimentais foram desenvolvidos.

Um dos dispositivos mais importantes para o estudo da eletricidade é o que hoje é conhecido como garrafa de Leyden.

Figura 1 - Representação de uma garrafa de Leyden.



Fonte: Marchant, 1914.

Nesse dispositivo, um frasco de vidro tem parte de seu interior e exterior revestidos por folhas metálicas. Ele é então parcialmente preenchido por água, e, na tampa, é inserido um pedaço de metal com uma corrente pendurada, de forma que a corrente, parcialmente imersa na água, toca o revestimento metálico interior. Na ponta do pedaço de metal, é colada uma esfera metálica.

Sua utilização consistia em atritar tecido contra um tubo de vidro e esfregar esse mesmo tubo na esfera metálica, carregando-a eletricamente.

Assim, quando uma pessoa tocava simultaneamente a esfera metálica e revestimento metálico externo, recebia um choque elétrico.

Nos dias atuais, sabe-se que se trata de uma forma primitiva de capacitor, no qual o vidro serve como material dielétrico. Os elétrons, partículas de carga negativa, adicionados por contato à esfera metálica, se distribuem ao longo da corrente e do revestimento interno. Já que corpos com cargas de mesmo sinal se repelem (ao passo que corpos de cargas de sinal oposto se atraem), ao aterrarr-se o revestimento externo, os elétrons do metal são repelidos pelo excesso de carga negativa no interior, provocando um saldo positivo de cargas no metal externo e eletrizando-o. Ao se tocar simultaneamente a esfera e o metal externo, um circuito é fechado pelo corpo que toca, através do qual surge brevemente uma corrente elétrica, que causa os efeitos fisiológicos do choque elétrico.

No século XVIII havia duas principais teorias vigentes para explicar o funcionamento da garrafa de Leyden: a teoria de Benjamin Franklin e a de Charles Du Fay (GILMOR, 1938).

De acordo com Franklin, havia um fluido imponderável, isto é, sem massa inercial, chamado de “fluido elétrico”, que permearia toda a matéria. Assis (2022) descreve:

“Acreditava-se que havia uma quantidade ou densidade normal deste fluido nas substâncias. Quando um corpo estivesse eletrizado positivamente, seria devido ao fato de possuir mais fluido elétrico do que a quantidade normal, ou seja, um excesso em relação à densidade normal de fluido. Da mesma forma, quando estivesse eletrizado negativamente, seria por possuir uma quantidade menor de fluido do

que a quantidade normal, ou seja, uma escassez ou deficiência em relação à densidade normal."

Franklin descreve o processo de eletrização da garrafa de Leyden:

"Ao mesmo tempo em que o fio e a parte superior da garrafa, etc., estão eletrizados positivamente ou em excesso, a parte inferior da garrafa está eletrizada negativamente ou com deficiência, em proporção exata: ou seja, qualquer quantidade de fogo elétrico lançada na parte superior é acompanhada por uma quantidade igual saindo da parte inferior. Para entender isso, suponha que a quantidade comum de Eletricidade em cada parte da garrafa, antes de iniciar a operação, seja igual a 20; e a cada esfregada do tubo, suponha que uma quantidade igual a 1 é lançada. Então, após a primeira esfregada, a quantidade contida no fio e na parte superior da garrafa será 21, na parte inferior será 19. Após a segunda, a parte superior terá 22, a inferior 18, e assim por diante, até que, após 20 esfregadas, a parte superior tenha uma quantidade de fogo elétrico igual a 40 e a parte inferior nenhuma. Nesse momento, a operação termina, pois não pode ser lançado mais na parte superior quando nada mais pode ser expulso da parte inferior. Se você tentar lançar mais fogo elétrico, ele é expelido pelo fio ou sai com estalos altos pelas laterais da garrafa."(FRANKLIN, 1747).

O termo “fogo elétrico” usado por Franklin passa a ser referido por ele como “fluído elétrico” em publicações posteriores. É interessante observar que Franklin já utiliza termos usados hoje em dia como “eletrizado positivamente” e “eletrizado negativamente”, apesar de se referirem a coisas diferentes.

A teoria de Du Fay, por outro lado, sugeria não apenas um, mas dois fluidos elétricos imponderáveis diferentes: um deles responsável pela electricidade “resinosa” e outro pela electricidade “vítreia”. Segundo ele próprio,

“A fim de saber rapidamente a qual das duas classes de eletricidade pertence algum corpo, é preciso somente eletrizar uma linha de seda, que sabemos pertencer à classe de eletricidade resinosa, e verificar se aquele corpo eletrizado a atrai ou a repele. Se ele a atrair, certamente é da classe de eletricidade que chamo de vítrea, e se ele a repelir é da mesma classe de eletricidade da seda, que é a resinosa. Observei da mesma forma que corpos para os quais transmitimos eletricidade retêm a mesma propriedade. Se uma bola de marfim ou de madeira for colocada sobre uma placa de vidro, e esta bola for eletrizada pelo tubo, ela repelirá todos os materiais que o tubo repele.” (DU FAY, 1733).

A ideia de Du Fay de “corpo eletrizado” era de um corpo com excesso de um dos dois tipos de fluido elétrico.

A eletricidade vítreia é a que hoje chamamos de negativa, enquanto a resinosa chamamos de positiva. Por meio desse trecho, é possível perceber que Du Fay descobriu o princípio de que corpos eletrizados com o mesmo tipo de eletricidade se repelem, enquanto aqueles eletrizados com tipos diferentes se atraem. Além disso, ele percebeu que um mesmo material poderia ser eletrizado pelos dois tipos de eletricidade, dependendo do material com o qual seria atritado (ASSIS,2022).

Apesar de Du Fay nunca ter escrito a respeito do funcionamento da garrafa de Leyden, podemos imaginar como ela funcionaria de acordo com a teoria de Du Fay. Ao se esfregar o tubo de vidro na esfera, ela estaria sendo carregada de eletricidade vítreia e, por consequência, também a parte interior do frasco. A eletricidade vítreia no interior atrairia a eletricidade resinosa da mão para o exterior do frasco.

Tanto a teoria de Du Fay quanto a de Franklin tinham em comum a ideia de que existia ao menos um fluido imponderável permeando a matéria e ambas explicavam todos os efeitos eletrostáticos conhecidos. Na comunidade científica da época, ambas as teorias encontravam adeptos entre os cientistas. Um desses cientistas, o francês Charles Augustin de Coulomb, era adepto da teoria de dois fluidos de Du Fay, como ele mesmo diz em sua sexta memória: "Prefiro a suposição de dois fluidos que já foi proposta por vários físicos [...]" (COULOMB,1791).

Na segunda metade do mesmo século, Coulomb se propôs a descrever uma lei matemática para a força entre corpos eletrizados em repouso. Influenciado fortemente pela lei newtoniana da força gravitacional, Coulomb propôs que essa força seria inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre os corpos eletrizados. Por meio dos experimentos relatados em sua primeira memória de 1785, Coulomb conclui:

"A força repulsiva entre duas pequenas esferas carregadas com o mesmo tipo de eletricidade é inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre os centros das duas esferas."(COULOMB,1785).

No mesmo ano, ele conclui em outra memória :

"Chegamos portanto, por meio de um método absolutamente diferente do primeiro, a um resultado similar; podemos concluir que a atração mútua do fluido elétrico que é chamado de positivo no fluido elétrico que é ordinariamente chamado de negativo é inversamente proporcional ao quadrado das distâncias; assim como encontramos em

nossa primeira memória, que a ação mútua dos fluidos elétricos de mesmo tipo é inversamente proporcional ao quadrado das distâncias.” (COULOMB,1785).

Nesse trecho, vemos que Coulomb chama os dois tipos de eletricidade de positiva e negativa. É importante notar, contudo, que, apesar da utilização de uma terminologia semelhante à de Franklin, Coulomb, na verdade, se refere aos dois fluidos elétricos chamados por Du Fay de resinosos e vítreos.

Em sua segunda memória, Coulomb relata novas investigações experimentais, nas quais ele estuda as relações entre a eletrização dos corpos e a força eletrostática. Para designar a grandeza hoje conhecida como carga elétrica, Coulomb usa, pelo que parece ser a primeira vez na história (GILLMOR,1938), o termo “massa elétrica”:

“Se essa força atrativa fosse proporcional à razão inversa do quadrado das distâncias (entre os centros das bolas eletrizadas), como encontramos para a força repulsiva em nossa Primeira Memória, teríamos [...] D igual ao produto da massa elétrica das duas bolas.” (COULOMB,1785)

Mais do que qualquer outro, o termo parece evidenciar a influência da concepção newtoniana da gravitação na formulação da lei eletrostática.

Além disso, ao final da segunda memória, ao sintetizar o que foi apresentado, Coulomb usa dois novos termos: “moléculas eletrizadas” e “densidade de fluido elétrico”.

“Da ação elétrica, seja ela repulsiva ou atrativa, das duas esferas eletrizadas, e, portanto, das duas moléculas eletrizadas, está numa razão entre as densidades do fluido elétrico das duas moléculas eletrizadas e o quadrado das distâncias.” (COULOMB,1785)

Apesar de ser difícil afirmar com certeza o que Coulomb quis dizer com esses termos, uma vez que ele nunca os explicou explicitamente, Gillmor (1938), Blondel e Wolff(2013) e Assis (2022) defendem que a expressão “moléculas eletrizadas” refere-se aos corpúsculos de metal (moléculas) carregados eletricamente, enquanto “densidade de fluido elétrico das moléculas” se refere à quantidade de fluido elétrico em cada molécula.

Essa posição sugere que Coulomb defendia que metais eram compostos pelo que ele chamava de "moléculas". É difícil afirmar qual era sua noção do que seriam as moléculas e se ela guarda qualquer semelhança com o conceito de molécula adotado pela química moderna, uma vez que, novamente, Coulomb nunca explica essa noção de forma explícita. Coulomb parece de fato defender essa ideia, a exemplo de um trecho de sua memória de 1784, traduzida por Assis (2022) sobre a elasticidade de fios de metal: “As partes integrantes do fio de ferro ou de latão, ou de um metal qualquer, possuem uma elasticidade que podemos considerar como perfeita [...]” (COULOMB, 1787). Sobre essa tradução, Assis comenta:

“Estou traduzindo como “partes integrantes” o que Coulomb denominou aqui de “parties intégrantes” de um fio. Essa expressão também poderia ser traduzida por “partículas integrantes” ou por “elementos integrantes”. Outras possibilidades de tradução seriam “partes (ou partículas ou elementos) constituintes”, “integrais”, “individuais” ou “constitutivas”[...]. Gillmor considera que essas expressões podem ser traduzidas em inglês por “individual particles” e “integral particles”, respectivamente [Gillmor, 1971a, pág. 159]. Ou seja, Coulomb tinha uma visão corpuscular, atômica ou molecular para a composição de um metal.”(ASSIS,2022).

Portanto, ao dizer que a força eletrostática “está numa razão entre as densidades do fluido elétrico das duas moléculas”(COULOMB,1785), Coulomb está se referindo à quantidade de fluido elétrico em dois corpúsculos de metal. Podemos afirmar, baseados nos termos usados pelo próprio Coulomb, que ele está se referindo às “massas elétricas” desses corpúsculos.

Utilizando o sistema gaussiano de unidades, a força entre dois corpos carregados com massas elétricas é, de acordo com as conclusões de Coulomb¹:

$$-\frac{qq'}{r^2} \quad (1.1)$$

onde q e q' são as massas elétricas nos corpos eletrizados e r é a distância entre eles.

Duas observações são pertinentes a respeito da percepção de Coulomb acerca da eletricidade. Primeiramente, não era seu principal objetivo a criação de uma teoria a respeito dos fluidos elétricos, suas origens ou a origem da força eletrostática, mas de meramente fornecer uma expressão matemática que pudesse ser usada para descrever tal força de forma quantitativa e qualitativa. Por conta disso, é fácil se confundir ao ler seus trabalhos e vê-lo usando os termos “massas elétricas”, “moléculas eletrizadas” e “densidades dos fluidos elétricos” sem quaisquer explicações. A abordagem utilizada por ele é um tema comum no desenvolvimento do eletromagnetismo pelos físicos continentais e é consoante com a abordagem utilizada por Newton, sendo

¹ Neste trabalho será utilizada a convenção de Ampère para a direção das forças, com o sinal negativo indicando repulsão e o sinal negativo indicando atração.

chamada por (WOODRUFF, 1962) de “programa newtoniano”, que consistia em prosseguir da forma mais puramente matemática possível, fazendo o mínimo possível de hipóteses acerca do fenômeno.

Essa inclinação de Coulomb fica evidente na continuação de seu comentário citado anteriormente a respeito de preferir a teoria de dois fluidos à de fluido único:

“Como essas duas explicações possuem apenas um grau de probabilidade maior ou menor, advirto, para deixar a teoria que vai seguir livre de toda disputa sistemática, que, na suposição de dois fluidos elétricos, tenho apenas a intenção de apresentar com o menor número de elementos possíveis os resultados do cálculo e da experiência, e não de indicar as verdadeiras causas da eletricidade.”

(COULOMB, 1791)

As semelhanças com a abordagem newtoniana ficam ainda mais evidentes ao se considerar que a força eletrostática proposta por Coulomb tem a mesma direção da reta que liga os corpos eletrizados, ou seja, é uma força central. Além disso, é também uma ação à distância e instantânea, assim como a lei de gravitação de Newton.

A segunda observação é que a força eletrostática de Coulomb é uma ação entre os fluidos elétricos imponderáveis que estão contidos nos corpos carregados, não entre os corpos em si. Em outras palavras, é uma força entre elementos imponderáveis mas que, de alguma forma, resulta no movimento dos corpos eletrizados, que por sua vez são ponderáveis. Esse ponto pode parecer, à primeira vista, de pouca relevância, no entanto ele revela a ideia implícita de que o fluido elétrico e a matéria inercial, que eram considerados

dois tipos de matéria não necessariamente relacionados um ao outro, de alguma forma interagiam. Essa ideia será retomada por outros cientistas no século seguinte, como será apresentado neste trabalho.

Na segunda memória de 1785, Coulomb também tentou descrever a interação entre ímãs e entre ímãs e a Terra. Nela, ele propôs uma expressão para a força entre polos magnéticos, guiado novamente pelo programa newtoniano:

"O fluido magnético age por atração ou repulsão em uma razão direta da densidade do fluido e inversamente proporcional ao quadrado da distância de suas moléculas".(COULOMB,1785).

Conforme vemos nesse trecho, Coulomb adota um sistema para o magnetismo semelhante àquele adotado para a eletricidade. Existiriam dois fluidos magnéticos, o fluido magnético sul e o fluido magnético norte, de forma que os fluidos semelhantes se repeliriam e os diferentes se atrairiam. Ímãs seriam corpos que possuem fluido magnético sul em seu polo sul e fluido magnético norte em seu polo norte. Vemos também o uso do termo “densidade do fluido” novamente, possivelmente se referindo, assim como no caso anterior, à quantidade de fluido magnético em cada corpúsculo de metal.

Podemos escrever a expressão para a força magnética proposta por Coulomb como:

$$-\frac{pp'}{r^2} \quad (1.2)$$

onde p e p' são as densidades de fluido magnético nos polos, convencionando-se o sinal positivo para o polo norte e o sinal negativo para o

polo sul. Apesar de ter verificado experimentalmente que a interação entre os ímãs enfraquece com o quadrado da distância, Coulomb não verificou a relação com a densidade de fluido magnético (ASSIS,2022).

Neste ponto da história, é visível a separação absoluta entre fenômenos elétricos e fenômenos magnéticos, havendo dois tipos de fluidos imponderáveis: fluido elétrico e fluido magnético. Essa percepção permaneceria inalterada e incontestada por mais 35 anos, até os experimentos do físico dinamarquês Hans Christian Ørsted, que serão abordados mais adiante.

2 - AS PRIMEIRAS NOÇÕES DE CORRENTE ELÉTRICA

Paralelamente a Coulomb, o cientista e médico italiano Luigi Galvani estudava um efeito de convulsão em animais, causado pelo contato simultâneo com lâminas de zinco e de cobre. A explicação mais aceita na época para tal fenômeno era a chamada “corrente galvânica”, que consistia na passagem de “eletricidade animal” existente nos animais, um outro tipo de eletricidade diversa daquela estudada por Coulomb, inerente a todos os animais (GEDDES; HOFF, 1971) . Apesar de essa explicação ter sido recebida com muito entusiasmo pela comunidade científica, o químico italiano Alessandro Volta foi um grande adversário dessa teoria, e, em 1800, propôs um aparato que ele dizia derrubar de vez a eletricidade animal: a pilha de Volta. A pilha consistia em placas de zinco e cobre empilhadas alternadamente, com papelão úmido entre elas, conforme mostra a figura 2.

De acordo com a explicação de Galvani, os metais em contato com o tecido do animal seriam responsáveis por “descarregar” a eletricidade animal contida nele. Volta atribuiu esse efeito ao contato de metais diferentes com uma superfície úmida, e, com sua pilha, mostrou que, de fato, bastava o contato de metais com uma superfície úmida para gerar descargas elétricas. Pela primeira vez na história, foi possível gerar correntes elétricas que durassem tempo o suficiente para serem estudadas.

Figura 2: Pilha de Volta construída por Humphry Davy



Fonte: Acervo digital da Royal Institution²

Volta estava convencido de que a corrente proveniente das pilhas, chamadas pelos seus adversários de “corrente voltaica”, era exatamente a mesma coisa que a corrente galvânica, e também o mesmo tipo de descarga elétrica que aquela decorrente da eletrização por atrito, e perceptível usando a garrafa de Leyden, diferente apenas na duração do fenômeno. Para diferenciar sua teoria das demais, ele utiliza em seu trabalho o termo “corrente elétrica” :

“Tudo isso mostra que, se o contato dos metais entre si em alguns pontos for apenas suficiente (pois eles são excelentes condutores) para permitir a passagem livre de uma corrente elétrica moderadamente forte o caso não é o mesmo com líquidos ou corpos

² Disponível em <<https://www.rigb.org/explore-science/explore/collection/alessandro-voltas-voltaic-pile>>. Acesso em 24 jul. 2023.

impregnados de umidade, que são condutores muito menos perfeitos; e que, consequentemente, precisam de um contato mais amplo com condutores metálicos e ainda mais entre si, para que o fluido elétrico possa passar facilmente e não seja muito retardado em seu percurso; especialmente quando é movido com muito pouca força, como no caso presente." (VOLTA, 1800)

Nesse trecho, é visível que Volta atribui a existência da corrente elétrica à passagem de fluido elétrico entre os condutores. Ele também menciona uma força responsável por mover os fluidos elétricos, cunhando o termo "força eletromotriz" para descrevê-la (VARNEY, 1980).

A teoria proposta por ele para explicar os fenômenos observados por Galvani não foi bem recebida inicialmente, e diferentes cientistas continuaram usando os termos corrente galvânica e corrente voltaica ao trabalhar com a pilha de Volta (BROWN, 1969).

Em 1820, o dinamarquês Hans Christian Ørsted divulga resultados de seus experimentos envolvendo correntes elétricas e ímãs. O termo utilizado por ele para se referir à corrente elétrica é "conflito de eletricidade":

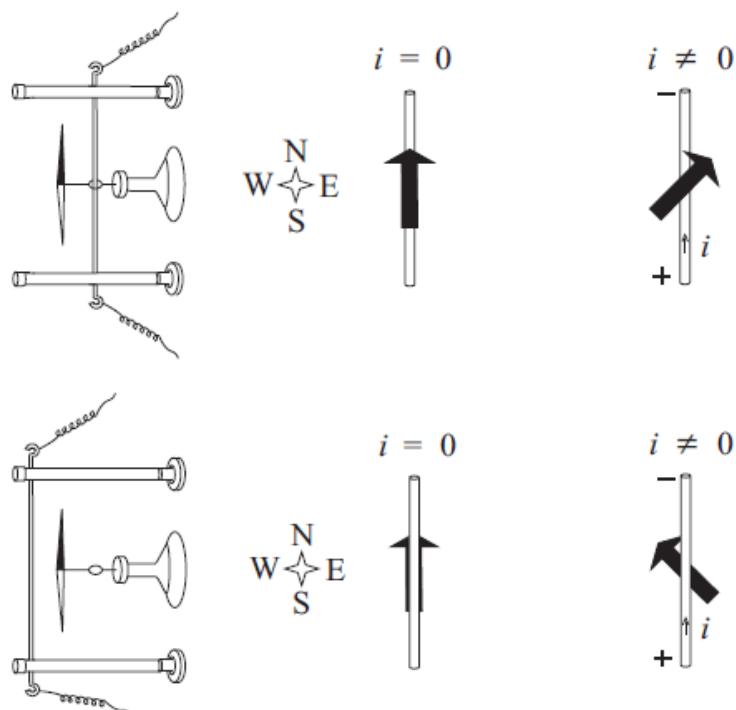
"As extremidades opostas da bateria galvânica [pilha de Volta] foram conectadas por um fio metálico, que, para simplificar, chamaremos de condutor unificador ou fio unificador. Ao efeito que ocorre nesse condutor e no espaço circundante, daremos o nome de conflito de eletricidade." (ØRSTED, 1820)

A concepção de Ørsted sobre a corrente elétrica seria, hoje em dia, caracterizada como uma concepção próxima à de campo. De acordo com ele, a corrente elétrica não é um fluxo contínuo dos fluidos elétricos positivo e

negativo, mas sim um processo turbulento em que ambos os fluidos se recombinariam e se separariam continuamente, gerando o "conflito elétrico". Além disso, esse conflito não estaria confinado apenas ao interior dos condutores, causando perturbações ao redor do mesmo.(REICH,2015).

Ørsted notou que, ao se aproximar um fio condutor de corrente de uma bússola, ocorria um desvio na agulha da bússola. Esse desvio dependia do sentido da corrente elétrica e da posição relativa entre a bússola e o fio. Para descrever esse fenômeno, Ørsted cunha o termo "eletromagnético" e "eletromagnetismo" (ASSIS,2015).

Figura 3: Representação do experimento de Ørsted.



Fonte: Assis e Chaib, 2015.

Seus resultados não foram publicados em nenhuma revista científica (ASSIS,2015). Em vez disso, ele enviou um breve relato, de apenas 4 páginas,

de seus experimentos para alguns cientistas da época, com uma breve explicação própria para as causas do fenômeno:

"Consideremos agora a razão de todos esses fenômenos. O conflito elétrico apenas atua sobre as partículas magnéticas da matéria. Todos os corpos não-magnéticos parecem ser permeáveis ao conflito elétrico; no entanto, os corpos magnéticos, ou suas partículas magnéticas, resistem à passagem desse conflito magnético, o que faz com que possam ser movidos pelo ímpeto das forças em luta." (ØRSTED, 1820)

Nesse trecho, vemos que Ørsted considera a existência de dois tipos de materiais: materiais magnéticos e materiais não-magnéticos. Essa ideia está diretamente ligada ao conceito anteriormente abordado sobre a forma como o conflito elétrico se dá ao redor dos condutores de corrente.

Os materiais magnéticos seriam aqueles materiais que são resistentes à passagem de conflito elétrico, ou seja, quando aproximados de um condutor permeado por corrente elétrica, estariam suscetíveis às perturbações dos fluidos elétricos ao redor do condutor. Por outro lado, os materiais não-magnéticos seriam permeáveis aos conflitos elétricos, ou seja, permitem a livre passagem dos fluidos elétricos e, portanto, não são movidos pelas perturbações neles. (CHAIB; ASSIS, 2009). Ørsted não foi o primeiro a propor teorias sobre forças baseadas em perturbação de fluidos, com teorias semelhantes encontrando defensores muitos anos antes, como Euler e Descartes (MARTIN, 1866), que rejeitavam a ideia de ação à distância.

Essa concepção de Ørsted da forma como a corrente elétrica interage com os ímãs sugere um distanciamento entre sua teoria e aquela que propunha a existência de fluidos magnéticos. Além disso, podemos apontar a teoria de Ørsted como uma das primeiras propostas de unificar a eletricidade e o magnetismo.

Dentre os cientistas que receberam o relato de Ørsted está o cientista inglês Humphry Davy, que em 1820 havia sido eleito presidente da Royal Society e rapidamente concentrou seus esforços em reproduzir os experimentos de Ørsted. Com o auxílio de seu assistente, Michael Faraday, Davy verifica as descobertas de Ørsted no mesmo ano (REICH,2015). Faraday viria a elaborar uma explicação baseada em campos, como era predominante entre os cientistas britânicos da época.

O relato também foi recebido na academia francesa, por cientistas hoje renomados, como André-Marie Ampère, François Arago, Jean-Baptiste Biot , Augustin Fresnel, Pierre-Simon Laplace e Félix Savart. (REICH,2015). Arago, que ocupava o cargo de professor de geometria analítica na École Polytechnique de Paris, se encarregou de reproduzir os experimentos para seus colegas no mesmo ano. Um de seus colegas na mesma instituição era André-Marie Ampère. (ASSIS,2015).

Ampère ficou fascinado com o fenômeno, conforme escreve em uma carta para seu filho no mesmo ano:

“[...] me arrependo muito de não ter enviado esta carta há três dias [...], mas todo o meu tempo tem sido tomado por uma circunstância importante da minha vida. Desde que escutei falar pela primeira vez da bela descoberta do Sr. Oersted, professor em Copenhagen, acerca da

ação das correntes galvânicas sobre a agulha imantada, tenho pensado nisso continuamente, não tenho feito outra coisa a não ser escrever uma grande teoria sobre esses fenômenos e sobre todos aqueles já conhecidos a respeito do ímã, e realizar as experiências indicadas por essa teoria, sendo que todas tiveram êxito e me fizeram conhecer vários fatos novos." (AMPÈRE, 1820)

3 - AS CONTRIBUIÇÕES DE AMPÈRE À ELETRODINÂMICA

A nova grande teoria de Ampère, assim como a de Ørsted, não previa a existência de um fluido magnético, porém, tinha diferenças radicais e fundamentais à teoria de Ørsted. Em primeiro lugar, a concepção de corrente elétrica de Ampère era diferente do conceito de "conflito elétrico", conforme ele mesmo escreve:

"Tais são os novos progressos que um ramo da física acaba de realizar, dos quais não tínhamos a menor ideia há apenas dois anos, e que nos fizeram perceber fatos mais surpreendentes do que qualquer coisa que a ciência nos tinha oferecido até agora em termos de fenômenos maravilhosos. Um movimento que continua sempre no mesmo sentido, apesar dos atritos, apesar da resistência do meio, com esse movimento sendo produzido pela ação mútua entre dois corpos que permanecem constantemente no mesmo estado, é um fato sem precedentes no meio de tudo o que sabemos sobre as propriedades que a matéria inorgânica pode oferecer. Isso prova que a ação que emana dos condutores voltaicos não pode ser atribuída a uma distribuição específica de certos fluidos em repouso dentro desses condutores, como é o caso das atrações e repulsões elétricas comuns. Essa ação só pode ser atribuída a fluidos em movimento dentro dos condutores, movendo-se rapidamente de uma extremidade da pilha para a outra extremidade." (AMPÈRE, 1822).

A "ação que emana dos condutores voltaicos" à qual Ampère se refere é a interação entre condutores percorridos por correntes e ímãs. Vemos nesse trecho que Ampère considera que o fluido elétrico se move apenas *dentro* dos condutores, diferentemente de Ørsted, que defendia que o "conflito elétrico" se dava não só dentro do condutor, mas também ao redor dele.

Ampère também afirma que tais interações são diferentes daquelas anteriormente estudadas por Coulomb:

"Vamos considerar agora a que [aspecto] é devida a diferença desses dois tipos de fenômenos, completamente distintos. Um deles consiste na tensão e nas atrações ou repulsões que são conhecidas há muito tempo, e o outro fenômeno consiste na decomposição da água e de muitas outras substâncias, nas mudanças de direção da agulha [magnetizada], e em um tipo de atrações e repulsões totalmente diferentes das atrações e repulsões elétricas ordinárias, que eu acredito ter sido reconhecido por mim pela primeira vez, e que eu denominei atrações e repulsões voltaicas, para distingui-las dessas últimas [atrações e repulsões elétricas ordinárias]."(AMPÈRE,1820).

Os termos "atrações e repulsões voltaicas" são posteriormente alterados em uma errata, em que ele as altera para "atrações e repulsões de correntes elétricas" (ASSIS,2015). Ele então ressalta: "*[...]a corrente galvânica, uma denominação que eu creio que deva ser mudada para corrente elétrica [...]*" (AMPÈRE,1820).

Um trecho de um manuscrito de 1820 mostra explicitamente que Ampère considera a corrente elétrica como sendo o movimento dos fluidos elétricos dentro do condutor:

"g e h dependem apenas da quantidade de eletricidade fluindo [através da seção transversal do condutor] em tempos iguais, a quantidade compensando a velocidade. Isso é [proporcional à] quantidade de movimento, desde que o caminho seja completamente livre, ou seja, desde que o condutor seja suficientemente espesso."(AMPÈRE,1820).

No contexto do manuscrito, *g* e *h* se referiam a intensidades de corrente elétrica. De acordo com Assis (2015), Ampère parece ter sido o primeiro

cientista a definir a intensidade de corrente elétrica da forma como a definimos atualmente.

De acordo com a teoria de Ampère, não apenas os fenômenos que Ørsted chamava de eletromagnéticos eram explicados por interações entre correntes elétricas, mas também os fenômenos puramente magnéticos, incluindo o funcionamento das bússolas:

"Quando pela primeira vez desejei encontrar as causas dos novos fenômenos descobertos pelo Sr. Oersted, refleti que, uma vez que a ordem em que dois fatos são descobertos não afeta de forma alguma quaisquer conclusões que podem ser tiradas das analogias que eles apresentam, poderia ter sido primeiro conhecido, antes de sabermos que uma agulha magnetizada aponta constantemente do Sul para o Norte, que uma agulha magnetizada tem a propriedade de ser influenciada por uma corrente elétrica e se posicionar perpendicularmente à corrente, de tal forma que o polo austral do ímã é desviado para a esquerda da corrente. E então, posteriormente, poderia ter sido descoberto que a extremidade da agulha que é desviada para a esquerda da corrente aponta constantemente para o Norte. Não seria a ideia mais simples, e aquela que imediatamente ocorreria a qualquer pessoa que quisesse explicar a direção constante do Sul para o Norte, postular uma corrente elétrica na Terra em uma direção tal que o Norte estivesse à esquerda de um homem que, deitado na sua superfície de frente para a agulha, recebesse essa corrente na direção dos seus pés para a sua cabeça, e tirar a conclusão de que ela ocorre de Leste para Oeste em uma direção perpendicular ao meridiano magnético?"(AMPÈRE,1820).

Nesse trecho, vemos a ideia central da teoria de Ampère: o que daria aos ímãs suas propriedades magnéticas seriam correntes elétricas permanentes em seus interiores.

Partindo dessa teoria, Ampère previu e observou um fenômeno que ainda não era conhecido até o momento: a força entre dois condutores permeados por correntes elétricas.

Do ponto de vista dele, o termo “eletromagnetismo” estava agora defasado. Ampère cunha, então, um novo termo: “eletrodinâmica” (CHAIB;ASSIS,2009). Conforme ele mesmo explica:

“Desde que descobri a ação mútua entre dois condutores voltaicos, que evidentemente tem a mesma natureza que a ação de um condutor sobre uma barra magnetizada e que atua sem a assistência de qualquer ímã, o nome de ação eletromagnética, que utilizo aqui apenas para me conformar com o uso comum, já não seria conveniente para designar esse tipo de ação. Acredito que ela deva ser conhecida pelo nome de ação eletrodinâmica.” (AMPÈRE,1822).

Em outro trabalho, Ampère explica melhor a escolha do nome, cunhando o termo “eletrostática”, usado até hoje com o mesmo sentido. (ASSIS,2015).

Segundo ele:

“A palavra *eletromagnética*, atribuída aos fenômenos produzidos pelo fio condutor da pilha de Volta, só poderia descrever convenientemente esses fenômenos na época em que eram conhecidos apenas os fenômenos descobertos por M. Oersted entre uma corrente elétrica e um ímã. Eu acredito que devo utilizar a denominação *eletrodinâmica*, a fim de combinar em uma única palavra todos esses fenômenos e, especialmente, para designar aqueles fenômenos que eu descobri

entre dois condutores voltaicos. Esse nome expressa a propriedade característica desses fenômenos, ou seja, serem produzidos pela eletricidade em movimento; enquanto as atrações e repulsões conhecidas há muito tempo são os fenômenos *eletrostáticos* produzidos pela distribuição desigual de eletricidade em repouso nos corpos nos quais esses fenômenos são observados." (AMPÈRE, 1822)

De 1820 a 1822 Ampère realizou uma série de experimentos para deduzir uma expressão para a força entre fios percorridos por correntes. Ele utilizou de quatro casos de equilíbrio, ou seja, casos em que as forças eletrodinâmicas resultantes nos fios são nulas, conforme ele descreve em sua obra prima de 1826 *Théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques: uniquement déduite de l'expérience* [Teoria matemática dos fenômenos eletrodinâmicos: deduzida unicamente da experiência].

O primeiro caso é o equilíbrio entre fios ortogonais, no qual ele verificou que correntes ortogonais não interagiam. O segundo caso é o equilíbrio entre um fio reto e um fio sinuoso, no qual ele verificou que a força sobre os fios pode ser obtida somando as contribuições de segmentos dos fios. No terceiro caso, há o equilíbrio de um semicírculo percorrido por corrente elétrica, no qual Ampère verificou que a força entre os fios não possuía componente tangencial. (ASSIS;CHAIB,2015).

No quarto e último caso, chamado por ele de "lei da equivalência", Ampère verificou o equilíbrio entre segmentos de tamanhos proporcionais à distância entre eles. Por exemplo, Ampère verificou que ao triplicar o tamanho

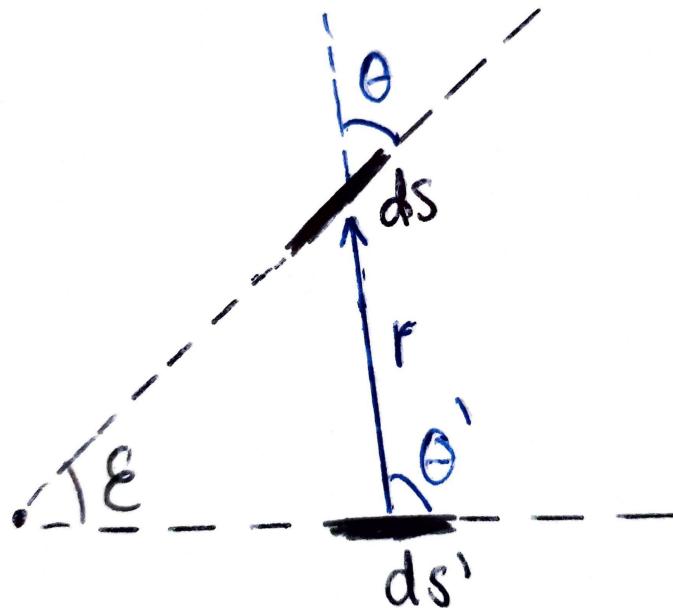
de dois fios, quando era triplicada também a distância entre eles, a interação entre eles era a mesma de antes. (ASSIS;CHAIB,2015).

Em 1822, Ampère chegou a uma expressão para a força que decorre da aproximação entre dois elementos infinitesimais de fio percorridos por correntes elétricas:

$$\frac{ids \cdot i' ds'}{r^2} \left(\cos \varepsilon - \frac{3}{2} \cos \theta \cos \theta' \right) \quad (3.1)$$

Nessa expressão, i e i' são as intensidades das correntes elétricas nos dois elementos de fio e ds e ds' são elementos de comprimento infinitesimais dos elementos de fio. Ampère chamava os produtos ids e $i' ds'$ de “elementos de corrente”. Além disso, r é a distância entre os centros dos elementos de corrente, o ângulo ε é o ângulo entre as retas que contém os elementos de fio e os ângulos θ e θ' são os ângulos entre a reta que liga os elementos e as retas que os contém. A figura 4 fornece uma ilustração desses ângulos. Ampère convenciona que caso a força tenha sinal positivo, é uma força de atração entre os elementos de fio, enquanto um sinal negativo indica repulsão entre os mesmos. Nesta lei, as intensidades de corrente têm o mesmo sinal se as correntes têm mesmo sentido, e sinais opostos caso tenham sentido contrário.

Figura 4: Representação dos elementos de fio e suas posições relativas nos termos da lei de força de Ampère



Fonte: de autoria própria.

A lei de força de Ampère, como essa expressão é muitas vezes chamada, trata da interação entre dois elementos infinitesimais de fio. No entanto, é capaz de descrever a interação entre dois fios finitos, já que, conforme verificado na segunda observação de Ampère, a força entre dois fios pode ser obtida ao se somarem as contribuições de todos os seus elementos de fio. Sendo assim, é possível calcular a força entre fios finitos efetuando uma integração dupla na expressão acima.

Uma outra diferença radical entre a percepção de Ampère e a de Ørsted, é que essa força proposta por Ampère é uma força de ação a distância, central e instantânea, estando consoante com o programa newtoniano e se afastando da ideia de que é necessário um mediador para as ações elétricas.

Outro fato importante a destacar é uma diferença crucial entre a força proposta por Ampère e a forma como era concebida a força eletrostática.

Enquanto a força eletrostática partia da ideia de que os próprios fluidos elétricos (imponderáveis) interagiriam – os fluidos iguais se repeliriam enquanto os diferentes se atraíam – a força de Ampère descrevia a interação direta entre *elementos de fios* (ponderáveis) percorridos por correntes elétricas. Ou seja, Ampère não fala a respeito de efeitos que uma corrente elétrica exerceia na outra, apenas dos efeitos que um fio exerce no outro.

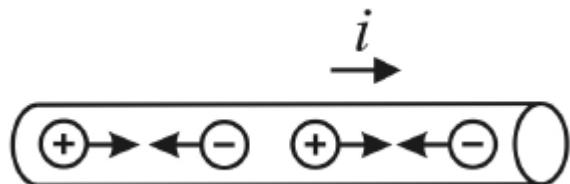
A respeito da origem da corrente elétrica a partir da pilha de Volta, Ampère escreve:

“Mas quando os dois corpos, ou dois sistemas de corpos, entre os quais ocorre a ação eletromotriz [por exemplo terminais da pilha], estão em contato por meio de corpos condutores [por exemplo fios] nos quais a ação eletromotriz não é igual e oposta à primeira, de modo a manter o estado de equilíbrio elétrico e, portanto, as tensões, essas tensões desaparecem, ou pelo menos se tornam muito pequenas, e ocorrem fenômenos característicos [eletrodinâmicos]. Uma vez que a disposição dos corpos entre os quais ocorre a ação eletromotriz é a mesma, a ação certamente continua, e uma vez que a atração mútua das duas eletricidades, medida pela diferença entre as tensões elétricas que se tornou zero, ou é consideravelmente diminuída, não pode mais equilibrar essa ação, geralmente se aceita que ela continua a transportar as duas eletricidades em dois sentidos como antes; assim, um duplo fluxo resulta, uma corrente positiva e outra corrente negativa, movendo-se em sentidos opostos dos pontos onde a ação eletromotriz ocorre para se encontrarem novamente na parte do circuito oposta a esses pontos.” (AMPÈRE, 1820).

Apesar da escrita de Ampère não ser muito clara, vemos nesse trecho que Ampère concebia que a corrente elétrica não era um único fluxo de fluido

elétrico, mas um fluxo duplo e oposto dos dois tipos de eletricidade. A figura 5 mostra um esquema de como seria a corrente elétrica.

Figura 5: Representação de como Ampère concebia a corrente elétrica.



Fonte: Assis e Chaib, 2015

Ampère convenciona, então, que o sentido da corrente elétrica é a direção do movimento do fluido positivo. Apesar de que, no caso de metais condutores, hoje se saiba que a corrente elétrica é devida ao movimento de elétrons do polo negativo ao positivo, a convenção de Ampère ainda é adotada nos dias atuais e, ao que tudo indica, tem nele a sua origem (ASSIS, 2015).

O trabalho de Ampère foi recebido com entusiasmo pela comunidade científica, porém acompanhado também de um pouco de cautela. Mesmo que Ampère tenha usado de métodos experimentais para obter a lei, sua validade nunca foi confirmada de forma satisfatória por ele, e seu trabalho fala muito pouco dos métodos por ele utilizados. Um comentário feito por James Clerk Maxwell em seu *Tratado sobre Eletricidade e Magnetismo* fornece uma boa ilustração da situação:

“O método de Ampère, no entanto, embora tenha sido moldado em uma forma indutiva, não nos permite rastrear a formação das ideias que o guiaram. Mal podemos acreditar que Ampère tenha realmente descoberto a lei de ação por meio dos experimentos que ele descreve. Somos levados a suspeitar, como ele mesmo nos diz, que ele

descobriu a lei por algum processo que não nos mostrou e que, quando posteriormente construiu uma demonstração perfeita, removeu todas as pistas da estrutura que havia erguido." (MAXWELL, 1873)

4 - A LEI ELÉTRICA UNIVERSAL DE WEBER

4.1 - As contribuições de Fechner

Em 1842, Weber aceitava a posição como professor na Universidade de Leipzig, de onde outro professor, Gustav Theodor Fechner, encontrava-se afastado devido a problemas de saúde desde 1840. Um acordo foi feito por meio do qual Weber continuaria como diretor do laboratório de Fechner até que sua condição melhorasse e, assim que isso ocorresse, ele receberia a diretoria de um novo laboratório de fenômenos magnéticos que estava para ser construído. (JUNGNICKEL,1990).

Contra as expectativas de muitos, alguns meses após a chegada de Weber, a saúde de Fechner subitamente melhorou. Durante o tempo em que esteve doente, seu interesse por física diminuiu consideravelmente, e seus novos interesses eram filosofia e psicologia. Havia, no entanto, um último assunto do qual ele gostaria de tratar: a eletrodinâmica, mais especificamente, a relação entre a indução de Faraday e a lei de força de Ampère. (JUNGNICKEL,1990).

Fechner relaciona, assim como Ampère, a corrente elétrica com o movimento do fluido elétrico, mas tem uma concepção diferente de como ocorre a interação entre fios permeados por corrente elétrica. Fechner defendia que a interação eletrodinâmica não tinha como protagonistas os fios em si, mas sim os fluidos elétricos em movimento no interior dos fios, de forma que a força eletrodinâmica age nos próprios fluidos, que, por sua vez, movem os fios.

Podemos observar que esta é uma semelhança entre a teoria de Fechner e as concepções vigentes sobre a eletrostática, segundo as quais a força agiria sobre os fluidos dentro dos corpos carregados, que, por sua vez, moveriam os corpos. De fato, a principal proposta de Fechner é que haveria uma lei universal da eletricidade, que seria capaz de explicar tanto os fenômenos eletrostáticos quanto eletrodinâmicos.

Um outro aspecto que destaca Fechner dentre os cientistas até agora apresentados é o fato de que ele era um defensor da teoria atomística da eletricidade, defendendo que os fluidos elétricos eram compostos por partículas indivisíveis fundamentais! Em seus trabalhos, Fechner retoma a expressão "massas elétricas" para se referir a tais partículas dos fluidos elétricos. (JUNGNICKEL, 1990)

A força proposta por Fechner entre as massas elétricas possui duas componentes: uma paralela aos fios e outra perpendicular aos fios.

Considere, por exemplo, dois fios paralelos, no fio 1 é criada uma corrente elétrica que aumenta com o tempo, enquanto no fio 2 não há corrente inicialmente. De acordo com as observações de Faraday, uma corrente induzida de mesmo sentido surgiria no fio 2. Fechner explica que as massas elétricas em movimento no fio 1 interagem com as massas elétricas em repouso no fio 2, gerando uma força elétrica. Sua componente paralela seria responsável por mover as massas elétricas em repouso no fio 2, gerando assim a corrente induzida. Além disso, de acordo com as observações de Ampère, haveria uma força atrativa entre os dois fios, já que são agora dois fios portadores de corrente em mesmo sentido. De acordo com Fechner, a

componente perpendicular da força elétrica seria a responsável pela força entre os dois fios.

De 1840 até 1845, Fechner buscou desenvolver sua teoria e a discutiu com seus colegas. Contudo, estes consideraram a teoria insatisfatória, uma vez que Fechner não tinha o conhecimento matemático suficiente para levá-la adiante e encontrar uma fórmula para a força universal da eletricidade, e sua teoria permaneceu puramente qualitativa. Um de seus colegas era Wilhelm Weber, que na época também se ocupava de estudar eletrodinâmica. Em 1845, Fechner publica seu trabalho como precursor à publicação de Weber do ano seguinte. (BROWN, 1969).

4.2 - Hipóteses iniciais de Weber

Em 1846, Weber publica sua obra-prima *DETERMINATIONS OF ELECTRODYNAMIC MEASURE: Concerning a Universal Law of Electrical Action*, dividida em duas partes. Na primeira parte, Weber realiza uma série de experimentos detalhados e sofisticados para confirmar a lei de Ampère de uma forma que ele considerasse satisfatória e pudesse servir de referência para estudos futuros. Na segunda parte, ele se ocupa de desenvolver as ideias de Fechner, obtendo uma lei que ele chama de "lei universal da ação elétrica". Weber, porém, julga que tal unificação não constituiria a essência do progresso da eletrodinâmica:

" [...] O progresso essencial para a eletrodinâmica em si não seria alcançado ao reduzir seus fundamentos aos fundamentos da

eletrostática, por mais importante e interessante que tal redução possa ser em outros aspectos.” (WEBER,1846)

Ainda assim, ele nota que, se fosse demonstrado que a teoria eletrodinâmica vigente não era capaz de descrever todos os fenômenos conhecidos, poderia ser frutífero buscar uma nova teoria mais geral partindo da unificação entre eletrodinâmica e eletrostática:

“E nesse caso, poderia muito bem ocorrer que essa lei definitiva fosse alcançada ao buscar, primeiro, reduzir a lei de Ampère a uma mais geral, que abrangesse a eletrostática. Ou seja, seria possível que, sob diferentes condições, a lei dos restantes fenômenos eletrodinâmicos, que não podem ser diretamente atribuídos à lei de Ampère, emergisse das mesmas fontes das quais tanto a lei eletrostática quanto a lei de Ampère foram derivadas. E assim, a base da eletrodinâmica em sua maior generalidade seria representada, não isoladamente em si, mas como dependente da lei mais geral da eletricidade, englobando os fundamentos da eletrostática.” (WEBER,1846)

Por acaso, existia, agora, uma nova classe de fenômenos que não eram descritos pela lei de Ampère, como Weber nota:

“Na verdade, existe uma classe de fenômenos eletrodinâmicos que, como assumimos ao longo deste tratado, dependem das ações recíprocas que as cargas elétricas exercem umas sobre as outras à distância, e que não estão incluídos na lei de Ampère e não podem ser explicados por ela, ou seja, os fenômenos de indução de Volta descobertos por Faraday. Isso se refere à geração de uma corrente em um fio condutor através da influência de uma corrente à qual ele é aproximado, ou à geração de uma corrente em um fio condutor quando

a intensidade da corrente em outro fio condutor próximo aumenta ou diminui." (WEBER,1846)

Conforme Weber nota, a incapacidade da lei de força de Ampère de descrever a indução de Volta, ou seja, a indução de uma corrente elétrica por meio da variação de uma outra corrente elétrica, se devia ao fato de esta lei tratar de correntes constantes e condutores em repouso, sendo, portanto, apenas um caso particular de uma lei geral ainda a ser descoberta:

"A lei de Ampère não deixa nada a desejar quando lida com as ações recíprocas de fios condutores cujas correntes possuem uma intensidade constante e que estão fixos em suas posições em relação uns aos outros. No entanto, assim que ocorrem mudanças na intensidade da corrente ou os fios condutores são movidos em relação uns aos outros, a lei de Ampère não oferece uma explicação completa e suficiente. Nesse caso, ela apenas informa as ações que ocorrem no elemento ponderável do fio, mas não as ações que ocorrem na eletricidade imponderável contida nele. Portanto, disso decorre que essa lei é válida apenas como uma lei particular e só pode ser temporariamente considerada como uma lei fundamental; ainda é necessária uma lei definitiva com validade verdadeiramente geral, aplicável a todos os fenômenos eletrodinâmicos, para substituí-la."

(WEBER,1846)

Com isso, Weber justifica de forma prática a busca por descrever os fenômenos eletrodinâmicos partindo da eletrostática, e afirma que essa relação poderia permitir realizar medições da indução observada por Faraday:

"Portanto, se abordarmos a conexão entre os fenômenos eletrostáticos e eletrodinâmicos, não precisamos apenas nos deixar guiar pelo interesse científico geral para aprofundar as relações existentes entre as várias áreas da física. Além disso, podemos estabelecer um

objetivo mais precisamente definido, relacionado à medição da indução de Volta por meio de uma lei mais geral da teoria elétrica pura. Essas medições da indução de Volta então, fazem parte das medições eletrodinâmicas que constituem o principal tema deste tratado e, quando estiverem completas, devem incluir também os fenômenos de indução de Volta. No entanto, é evidente que o estabelecimento dessas medições está profundamente conectado com o estabelecimento das leis às quais os fenômenos em questão estão sujeitos, de forma que um não pode ser separado do outro.”

(WEBER,1846)

Após fazer essas considerações, Weber inicia seu desenvolvimento para obter tal lei universal. Para isso, ele parte de três pressupostos que, de acordo com ele, “[...] são, em parte, baseadas indiretamente em observações e, em parte, contidas diretamente na lei de Ampère, a qual é confirmada por todas as medições.” (WEBER,1846). Ele prossegue:

“O primeiro fato é que dois elementos de corrente dispostos em uma linha reta que coincide com suas direções se repelem ou se atraem, dependendo se a eletricidade flui através deles na mesma direção ou em direções opostas [respectivamente].” (WEBER,1846)

É um fato amplamente conhecido nos dias atuais que fios paralelos cujas correntes têm mesmo sentido se atraem, enquanto fios paralelos cujas correntes têm sentidos opostos se repelem. Esse primeiro fato apontado por Weber, no entanto, é relacionado não a fios paralelos, mas a dois elementos de corrente distintos colineares, que, ao contrário dos fios paralelos, ele afirma se repelirem caso as correntes tenham mesmo sentido e se atraírem caso as correntes tenham sentido oposto.

Essa afirmação, um tanto menos conhecida, era obtida em decorrência da lei de Ampère apresentada no capítulo 3. Segundo ele, a força entre dois elementos de corrente é

$$\frac{ii'dsds'}{r^2} \left(\cos \varepsilon - \frac{3}{2} \cos \theta \cos \theta' \right) \quad (4.1)$$

Para elementos de corrente sobre a mesma linha, o ângulo entre ambas as linhas é nulo, e, portanto, $\varepsilon = 0^\circ$. Além disso, o vetor que liga os dois segmentos têm a mesma direção que a linha na qual eles estão contidos, ou seja, tanto θ quanto θ' são nulos. Com isso, a força entre eles se reduz a

$$-\frac{ii'dsds'}{2r^2} \quad (4.2)$$

Caso as correntes tenham mesmo sentido, ou seja, ambas positivas ou negativas, o sinal da força é negativo, o que, para Ampère, indicava uma repulsão. Enquanto isso, se as correntes tiverem sinais opostos, a força é positiva, indicando, para Ampère uma atração. Assim, obtém-se o primeiro fato destacado por Weber.

Ele, então, prossegue:

"O segundo fato é que dois elementos de corrente paralelos, que formam ângulos retos com uma linha que os conecta, se atraem ou se repelem, dependendo se a eletricidade flui através deles na mesma ou em direções opostas [respectivamente]." (WEBER,1846)

Trata-se do fato já conhecido e mencionado anteriormente a respeito da atração e repulsão de fios paralelos. Esse fato, além de demonstrado experimentalmente por Ampère, é também demonstrado por sua lei de força.

De fato, considere dois portadores de corrente paralelos, conectados por uma linha imaginária que faz um ângulo reto com suas direções. Nesse caso, o vetor que os liga está sobre esta linha imaginária, formando, também, um ângulo reto com ambos os portadores. Ou seja, $\theta = \theta' = 90^\circ$. Além disso, como eles são paralelos entre si, $\varepsilon = 0^\circ$. De acordo com a lei de força de Ampère, a força entre eles se reduz a

$$\frac{ii'dsds'}{r^2}, \quad (4.3)$$

prevendo, portanto, uma atração quando as correntes têm mesma direção e uma repulsão quando as correntes têm direções opostas.

O terceiro fato de Weber, o único não explicado pela lei de Ampère, trata da indução de Volta:

"O terceiro fato é que um elemento de corrente, que está alinhado com um elemento de fio em uma linha reta coincidindo com as direções de ambos os elementos, induz uma corrente no mesmo sentido ou sentido oposto no elemento de fio, dependendo se a intensidade de sua própria corrente diminui ou aumenta [respectivamente]."
(WEBER,1846)

A seguir, Weber faz a distinção entre a forma como ele considera esses fenômenos em comparação com a forma como Ampère os considerava:

"Os três fatos apresentados são considerados como elétricos, ou seja, consideramos as forças indicadas como ações de massas elétricas entre si. No entanto, a lei elétrica desta ação recíproca ainda é desconhecida. Mesmo que os dois primeiros fatos sejam

compreendidos sob a lei de Ampère, ainda assim, mesmo à parte do terceiro fato, que não é compreendido por ela, a lei de Ampère em si, no sentido estrito, não é uma lei elétrica, pois não identifica nenhuma força elétrica que uma massa elétrica exerça sobre a outra. A lei de Ampère apenas fornece uma maneira de identificar uma força que atua sobre a massa ponderável do condutor. Ampère não tratou das forças elétricas que os fluidos elétricos que fluem através do condutor exercem uns sobre os outros, embora ele tenha expressado repetidamente a esperança de que fosse possível explicar o efeito recíproco dos condutores ponderáveis identificados por sua lei, em termos das ações recíprocas dos fluidos elétricos neles contidos."

(WEBER,1846)

Já nesse trecho é visível que Weber pretende adotar as hipóteses de Fechner, ou seja, atribuir as forças eletrodinâmicas à ação entre as massas elétricas contidas nos portadores de corrente, e não como uma ação entre os portadores de corrente em si. Além disso, apesar de Weber não dizer explicitamente o que seriam as massas elétricas, é provável que ele estivesse se referindo exatamente à mesma ideia que foi defendida por Fechner: massas elétricas seriam partículas de fluido elétrico. Em diversos trechos, Weber usa a expressão "partículas elétricas", como por exemplo:

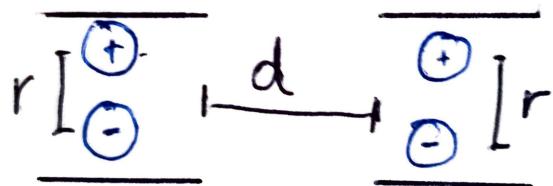
"Além da mudança na velocidade das partículas elétricas enquanto se movem de uma molécula do condutor ponderável para a próxima, também devemos considerar as mudanças de direção pelas quais as partículas em aproximação evitam umas às outras." (WEBER,1846)

Nesse trecho vemos claramente que a ideia a qual se refere a expressão "partícula elétrica" de Weber difere daquela a qual Coulomb se referia através de "molécula eletrizada", já que Weber fala que as partículas elétricas se

movem de uma molécula do condutor ponderável para outra. Para Coulomb, uma molécula eletrizada era um corpúsculo ponderável e permeado por fluido elétrico. Para Weber, partículas elétricas são corpúsculos do próprio fluido, que tem a capacidade de se mover entre corpúsculos ponderáveis.

Além disso, Weber adota a hipótese de Ampère sobre o fluxo dos fluidos elétricos: *"Se agora direcionarmos nossa atenção aos fluidos elétricos nos dois elementos de corrente, temos neles quantidades iguais de eletricidade positiva e negativa, que, em cada elemento, estão em movimento de forma oposta."* (WEBER, 1846). Weber chama esses elementos de "portadores de corrente". Com isso, deveria haver quatro pares de forças recíprocas entre dois portadores de corrente: dois repulsivos entre as massas elétricas iguais e dois atrativos entre as massas elétricas diferentes de ambos os portadores.

Figura 6: Disposição das massas elétricas em dois portadores de corrente.



Fonte: de autoria própria

Considere o esquema apresentado na figura 6, representando a disposição das cargas em dois portadores de corrente. Caso a lei de Coulomb se aplicasse a essa situação, Weber afirma que a resultante sobre as massas

elétricas deveria ser nula, já que a distância r entre as cargas de um mesmo portador seria desprezível comparada com a distância entre os portadores. Sendo assim, a atração sofrida por uma massa elétrica devido à massa de sinal oposto deveria ser igual à repulsão sofrida por ela devido à massa de mesmo sinal. Sobre a aplicabilidade a lei eletrostática, ele afirma:

"Se as leis eletrostáticas reconhecidas encontram uma aplicação incondicional ao nosso caso, não pode ser decidido a priori, porque essas leis se referem principalmente a massas elétricas que estão em equilíbrio e em repouso umas em relação às outras, enquanto nossas massas elétricas estão em movimento em relação umas às outras. Portanto, apenas a experiência pode decidir se essa lei eletrostática permite uma aplicação ampliada também ao nosso caso."

(WEBER,1846)

Para se falar da força eletrostática como responsável pelo movimento dos portadores de corrente, é necessário falar sobre a forma como a força elétrica é transmitida aos portadores. Weber afirma, assim como Fechner, que a força que age sobre os portadores ponderáveis deve ser a resultante das forças agindo sobre as massas elétricas imponderáveis:

"Os dois primeiros fatos mencionados acima referem-se, é claro, principalmente a forças que atuam nos portadores de corrente ponderáveis; no entanto, podemos considerar essas forças como resultantes das forças que atuam nas massas elétricas contidas no portador ponderável. Estritamente falando, essa forma de considerar essas forças só é permitida quando essas massas elétricas estão ligadas ao seu portador ponderável comum de tal forma que não podem ser postas em movimento sem ele." (WEBER,1846)

Weber conclui que é necessário assumir que as massas elétricas não poderiam se mover de forma independente de seus portadores ponderáveis. Essa suposição sugere não só que quando o fio se move, a corrente se move junto dele, mas também a recíproca: quando a corrente se move, o fio se move junto dela. A primeira afirmação não apresenta problemas já que, de fato, quando um fio é movido a corrente se move junto a ele e, portanto, movem-se também as massas elétricas nele contidas. Já a recíproca podemos dividir em dois casos: o movimento das massas elétricas paralelo à direção do fio e o movimento das massas perpendicular à direção do fio.

Caso as massas elétricas fossem se mover em direção perpendicular à do fio, então o fio deveria se mover junto a elas, na mesma direção. Essa proposta de Weber é semelhante àquela das forças perpendiculares de Fechner. O problema está no caso do movimento das massas elétricas na mesma direção do fio, pois quando há corrente elétrica as massas se movem mesmo quando o fio permanece em repouso. Weber deveria, então, explicar de que forma o movimento da corrente elétrica é transmitido ao fio.

Para resolver essa questão, Weber considera uma propriedade das correntes elétricas: elas cessam a partir do momento que não há força eletromotriz.

“Embora as massas elétricas sejam suscetíveis a serem deslocadas na direção do fio condutor, elas de forma alguma são livremente móveis nessa direção; caso contrário, elas teriam que persistir no movimento uma vez que fosse transmitido a elas nessa direção, sem um novo impulso externo (ou seja, sem uma força eletromotriz contínua), o que

não é o caso. Pois nenhuma corrente galvânica persiste por si só, mesmo com o circuito continuamente fechado. Ao invés disso, a intensidade de qualquer corrente em um determinado momento corresponde apenas à força eletromotriz existente, conforme determinado pela lei de Ohm; assim, a corrente para por si só assim que essa força desaparece. " (WEBER,1846)

Com isso, Weber propõe que há de fato uma interação entre os portadores de corrente e as massas elétricas em seus movimentos paralelos, caso contrário, as massas elétricas continuariam em movimento mesmo sem força eletromotriz. Dessa forma, Weber aponta a interação das massas elétricas com o fio como responsáveis por fazer a corrente elétrica cessar. Podemos entender melhor essa ideia de Weber por meio de uma analogia com a resistência do ar. Considere um corpo posto queda livre na atmosfera terrestre. A partir do momento em que o corpo é solto, ele sofre a ação de duas forças: o peso e a resistência do ar, esta segunda sendo proporcional à velocidade do corpo. Num primeiro momento, a força peso supera a resistência do ar e o corpo acelera para baixo. Conforme sua velocidade aumenta, a resistência do ar também aumenta, diminuindo a aceleração do corpo até que ela seja nula, no momento em que a resistência do ar se iguala à força peso. Essa velocidade máxima do corpo é chamada de *velocidade terminal*, e o corpo mantém essa velocidade até atingir o solo. Suponha agora, que, de alguma forma, a força peso cesse de existir. O corpo adquiriria uma aceleração para cima, de forma que, eventualmente, sua velocidade chegaria a zero.

Para Weber, algo semelhante ocorreria num fio percorrido por corrente elétrica. Ao conectar o fio à bateria, a corrente aumentaria, por conta da força

eletromotriz, ao longo de um intervalo de tempo imensuravelmente curto, até um limite máximo, determinado pela resistência elétrica. Assim que cessasse a força eletromotriz, a corrente elétrica diminuiria, por conta da resistência elétrica, até cessar completamente, em um intervalo de tempo também minúsculo.

Weber explica, portanto, que a interação entre as massas elétricas e os elementos de fio se dá por meio da resistência elétrica:

"A ação direta das forças paralelas ao fio condutor consiste, com certeza, simplesmente em um movimento das massas elétricas nessa direção; no entanto, o efeito desse movimento é uma *resistência* no portador ponderável, por meio da qual, em um tempo imensuravelmente curto, ele é neutralizado novamente. Através dessa resistência, durante o intervalo de tempo em que esse movimento é neutralizado, todas as forças que haviam anteriormente induzido esse movimento são transmitidas indiretamente aos corpos ponderáveis que exercem a resistência." (WEBER,1846)

Ao fazer isso, Weber não apenas soluciona um problema com sua teoria, mas também engloba nela a primeira lei de Ohm, apresentada em 1826 pelo cientista francês Georg Simon Ohm, que afirma que a intensidade da corrente elétrica é diretamente proporcional à força eletromotriz, ou seja, a diferença de potencial elétrico, e inversamente proporcional a uma característica do condutor chamada de resistência elétrica (ATHERTON,1986).

Na notação atual, temos

$$i = \frac{U}{R} . \quad (4.4)$$

Por fim, resta discutir o efeito dessa interação nos próprios portadores de corrente, uma vez que, se eles fornecem uma resistência às massas elétricas, pela terceira lei de Newton deveria haver uma força das massas elétricas sobre os portadores de corrente, fazendo com que se movessem de forma paralela à corrente. Sobre isso, Weber prossegue:

"Por fim, uma vez que estamos lidando com os efeitos de forças que têm a capacidade de comunicar uma velocidade mensurável ao próprio portador ponderável, então, por outro lado, aqueles efeitos de [reação das] forças que perturbam apenas momentaneamente as massas imponderáveis podem ser desprezados com a mesma justificativa com a qual desprezamos a massa da eletricidade em comparação com a massa do seu portador ponderável." (WEBER,1846)

Isto é, esses efeitos, além de momentâneos, poderiam ser considerados negligenciáveis.

Uma vez solucionadas as questões relacionadas ao movimento paralelo das massas elétricas, Weber conclui, finalmente: "A partir disso, no entanto, conclui-se que a força que atua no portador da corrente age, como mencionado acima, como a resultante de todas as forças que atuam nas massas elétricas contidas no portador da corrente."(WEBER,1846).

Tem-se, portanto, assim como assumido por Fechner, duas componentes de força elétrica sobre as massas, uma paralela e outra perpendicular: a perpendicular sendo a responsável pela atração e repulsão de

portadores de corrente em condutores diferentes e a paralela sendo responsável não só pela indução de Volta, mas também pela resistência elétrica.

4.3 - Dependência das velocidades das massas elétricas

Feitas essas hipóteses, Weber retorna ao caso prévio em que dois portadores de corrente interagem por meio de quatro pares de forças. Como mencionado anteriormente, caso fosse aplicável a lei de Coulomb, não haveria força resultante sobre as massas elétricas. Observe, no entanto, os dois primeiros fatos apontados por Weber e suas deduções da lei de força de Ampère: as forças entre os portadores de corrente sempre aumentam com a intensidade da corrente. Segundo a hipótese de que a força entre os portadores é a resultante das forças entre as massas elétricas, isso implica que as forças elétricas entre as massas elétricas também aumentam com a intensidade da corrente. Com isso, Weber conclui:

"Isso pressupõe, como mostrado pelos dois primeiros fatos mencionados acima, que o resultado daquelas quatro ações recíprocas das massas elétricas contidas nos dois elementos de corrente em questão, que, de acordo com as leis eletrostáticas, deveria ser zero, se afasta mais de zero quanto maior a velocidade com que as massas elétricas fluem através de ambos os elementos de corrente, ou seja, quanto maior as intensidades de corrente." (WEBER,1846)

Uma suposição extremamente importante é feita explicitamente nesse trecho: a intensidade da corrente elétrica estaria relacionada à velocidade com

que as massas elétricas fluem. Assim, Weber atribui à velocidade das massas elétricas o fato de as forças entre portadores de corrente aumentarem com a intensidade da corrente.

Dentro das hipóteses levantadas, a lei de Coulomb de fato não encontraria aplicação incondicional, conforme Weber explica:

"Desta forma, segue que as leis eletrostáticas não têm aplicação incondicional em massas elétricas que estão em movimento em relação umas às outras. Pelo contrário, essas leis fornecem apenas um valor limite para as forças que essas massas reciprocamente exercem uma sobre a outra, e o verdadeiro valor dessas forças se aproxima mais do valor limite quanto menores forem os movimentos recíprocos das massas, enquanto se afasta mais do valor limite quanto maiores forem os movimentos recíprocos. " (WEBER,1846)

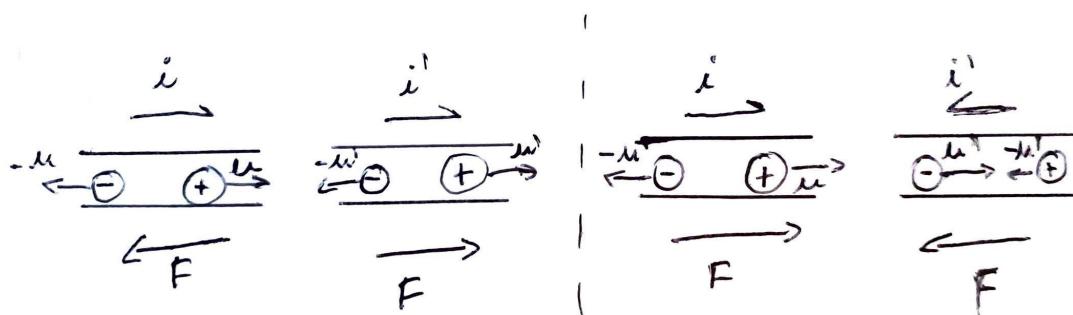
Ou seja, a lei eletrostática fornecida por Coulomb oferece apenas um valor limite superior para quando as massas elétricas estão em repouso, e o verdadeiro valor da força elétrica diminui quanto maior forem as velocidades das mesmas. Isso implica que uma lei universal para a eletricidade deve depender dos movimentos entre as massas elétricas. Assim, Weber dá início a essa investigação:

"Para determinar corretamente a força exercida por duas massas elétricas uma sobre a outra, além dos valores fornecidos pelas leis eletrostáticas, deve ser adicionado um complemento dependente de seu movimento recíproco. Isso é necessário para obter uma determinação correta da força não apenas no caso de repouso e equilíbrio mútuo, mas universalmente, incluindo qualquer movimento

arbitrário das duas massas em relação uma à outra. Esse complemento, que conferiria às leis eletrostáticas uma aplicabilidade mais geral do que possuem atualmente, será agora buscado. " (WEBER,1846)

Weber começa buscando uma forma de satisfazer o primeiro fato: dois portadores de corrente colineares se repelem se tiverem mesmo sentido e se atraem se tiverem sentidos opostos. Ambos os casos são ilustrados na figura 7, considerando-se desprezíveis as distâncias entre as cargas de um mesmo portador. A partir de agora, as massas do primeiro portador, cuja corrente é i , serão denotadas e e $-e$, para a positiva e negativa respectivamente. As velocidades das massas no primeiro portador serão chamadas de u , com a convenção de que o sentido positivo é da esquerda para a direita. Já para o segundo portador, de corrente i' , as respectivas grandezas serão denotadas e' , $-e'$ e u' .

Figura 7 - Velocidades relativas entre massas elétricas de portadores de corrente colineares de mesmo sentido (esquerda) e sentidos opostos (direita).



Fonte: de autoria própria.

No caso em que ambos têm mesmo sentido – caso à esquerda na figura 7 – temos as seguintes velocidades relativas para as massas de mesmo sinal:

$$\text{entre } + e e + e' : \frac{dr}{dt} = u - u', \quad (4.5)$$

$$\text{entre } - e e - e' : \frac{dr}{dt} = -u + u' = - (u - u'). \quad (4.6)$$

Enquanto para as massas de sinais opostos:

$$\text{entre } + e e - e' : \frac{dr}{dt} = u + u', \quad (4.7)$$

$$\text{entre } - e e + e' : \frac{dr}{dt} = -u - u' = - (u + u'). \quad (4.8)$$

Os dois casos de mesmo sinal podem ser condensados numa única sentença:

$$\left(\frac{dr}{dt} \right)^2 = (u - u')^2 \quad . \quad (4.9)$$

Os casos de sinal oposto, por sua vez, podem ser condensados na expressão:

$$\left(\frac{dr}{dt} \right)^2 = (u + u')^2 \quad (4.10)$$

Note, portanto, que as velocidades relativas entre massas de sinais opostos são maiores do que entre as de mesmo sinal, já que as primeiras

consistem na adição de velocidades enquanto as últimas consistem na diferença de velocidades. Como nesse caso os portadores devem se repelir, as interações elétricas entre as massas de sinal oposto, ou seja, atrativas, devem ser mais fracas do que entre as massas de mesmo sinal, ou seja, repulsivas, de forma que a resultante sobre os elementos de corrente deve ser atrativa.

Weber conclui:

"O primeiro fato, ao qual a declaração acima se refere, permite ainda a adição da seguinte determinação mais precisa: duas massas elétricas (repulsivas ou atrativas, dependendo se são iguais ou diferentes) agem de forma mais fraca uma sobre a outra, quanto maior for o quadrado de sua velocidade relativa." (WEBER, 1846)

Weber propõe que a forma matematicamente mais simples de representar esta conclusão é pela multiplicação da lei eletrostática pelo fator

$$\left(1 - a^2 \left(\frac{dr}{dt}\right)^2\right), \quad (4.11)$$

que se reduz a 1 no caso em que as massas elétricas se encontram em repouso. Na expressão, o termo a^2 é uma constante a ser determinada.

Podemos observar que se espera que o termo de velocidade relativa na expressão deve ser menor do que 1, caso contrário a velocidade relativa poderia ser responsável por alterar o sentido da força. Isso implica a existência de uma velocidade relativa máxima para as massas elétricas, na qual o fator é nulo. Nesse caso limite, obtém-se:

$$a^2 \left(\frac{dr}{dt} \right)_{max}^2 = 1 \Leftrightarrow |a| = \left| \frac{dr}{dt} \right|_{max}^{-1} \quad (4.12)$$

ou seja, o valor da constante deve ser o inverso da velocidade relativa máxima. Podemos intuir, com os conhecimentos comuns atualmente, que essa constante deve ter alguma relação com a velocidade da luz c . De fato, tal desenvolvimento é realizado posteriormente por Weber, que encontra um valor para a constante como sendo equivalente a $\sqrt{2}c$. De todo modo, é interessante notar o surgimento de tais consequências profundas de uma hipótese discutivelmente simples, e que viriam a ser confirmadas de fato posteriormente.

Ao multiplicar a lei eletrostática pelo fator proposto por Weber, obtém-se que a força elétrica universal deve ter forma³

$$-\frac{ee'}{r^2} \left(1 - a^2 \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 \right). \quad (4.13)$$

Para cumprir a proposta buscada por Weber, ao se somarem todas as forças entre as massas elétricas, o resultado deve ser semelhante ao da lei de Ampère, uma vez que a força sobre o elemento de corrente deve ser a resultante das forças entre as massas elétricas. Substituindo as expressões para as velocidades relativas acima obtidas, obtém-se, somando as repulsões para as duas massas de mesmo sinal:

³ A fórmula encontrada por Weber em seu artigo original de 1846 na verdade não tem o sinal negativo aqui apresentado. A escolha de utilizar o sinal negativo nesse trabalho é uma tentativa de manter as convenções de sentido das forças, uma vez que Ampère e Weber usavam convenções opostas. Nesse trabalho, será utilizada a convenção de Ampère em todos os casos, ou seja, sinais negativos denotam repulsões e sinais positivos denotam atrações

$$-2 \frac{ee'}{r^2} (1 - a^2(u - u')^2) \quad (4.14)$$

Já para as massas de sinais opostos, a soma das atrações é:

$$2 \frac{ee'}{r^2} (1 - a^2(u + u')^2) \quad (4.15)$$

A resultante entre todas as massas elétricas é a soma das expressões acima.

$$2 \frac{ee'}{r^2} (1 - a^2(u + u')^2) - 2 \frac{ee'}{r^2} (1 - a^2(u - u')^2) \quad (4.16)$$

Cancelando-se as contribuições do termo eletrostático,

$$2a^2 \frac{ee'}{r^2} ((u - u')^2 - (u + u')^2) \quad (4.17)$$

Expandindo os termos quadráticos e efetuando-se as somas, obtém-se, finalmente,

$$-8a^2 \frac{ee'}{r^2} uu' \quad (4.18)$$

uma expressão muito próxima daquela obtida pela lei de força de Ampère,

$$-\frac{ii'dsds'}{2r^2} \quad (4.19)$$

Na expressão de Weber, os sentidos das correntes são expressos pelos sinais das velocidades. Sinais iguais correspondem ao mesmo sentido, mantendo a expressão negativa e indicando repulsão, conforme o esperado. Sinais opostos

correspondem a sentidos opostos de corrente, tornando a expressão positiva e indicando atração, novamente, como era esperado.

Sobre esses resultados, Weber comenta:

"Dessa forma, segue que essa força, em completa concordância com a lei de Ampère, é diretamente proporcional à intensidade da corrente em ambos os elementos de corrente e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre os dois elementos de corrente."
(WEBER,1846)

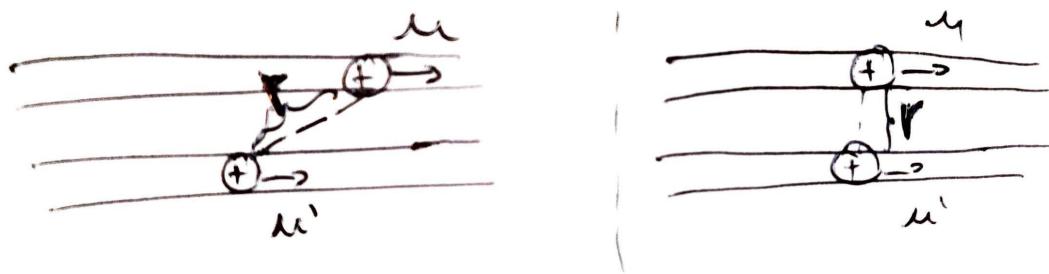
Ao comparar as duas últimas equações, elas são idênticas a menos de uma constante caso valha que $i = aeu$. Ao afirmar que seu resultado está em completa concordância com a lei de Ampére, Weber assume implicitamente a validade dessa relação.

4.4 - Dependência das acelerações das massas elétricas

O fator desenvolvido por Weber até agora é capaz de explicar o primeiro fato por ele proposto. Contudo, o mesmo não vale para o segundo fato: que dois portadores de corrente paralelos, que formam um ângulo reto com a linha que os conecta, se atraem ou se repelem dependendo de se as correntes têm mesmo sentido ou sentidos opostos respectivamente.

Considere o caso de correntes de mesmo sentido. Duas massas elétricas se movem ao longo de fios paralelos, conforme indicado pela figura 8.

Figura 8 - Velocidades relativas e distância entre massas elétricas de portadores de corrente paralelos de mesmo sentido no momento em que a linha que os liga é perpendicular a eles (direita) e instantes antes(esquerda) .



Fonte: de autoria própria.

A distância r entre as massas elétricas dentro do portador é mínima no instante em que a linha que os conecta é perpendicular aos portadores. Antes desse instante, a distância diminuía, a velocidade relativa sendo negativa; já após esse instante, a distância passa a aumentar, a velocidade relativa sendo positiva. Com isso, observa-se que a velocidade relativa *exatamente no instante* descrito pelo segundo fato é nula,

$$\frac{dr}{dt} = 0 \quad , \quad (4.20)$$

e, assim sendo, a força desenvolvida anteriormente se reduz à lei eletrostática e se torna necessário fazer mais alguma modificação ao que foi encontrado até o momento.

Weber observa o seguinte:

"É facilmente comprovado, no entanto, que para essa segunda classe de casos, onde o valor da velocidade relativa dr/dt desaparece, o valor da aceleração relativa d^2r/dt^2 se destaca ainda mais significativamente, enquanto para a primeira classe, onde o último valor d^2r/dt^2 desaparece, o primeiro dr/dt se destaca ainda mais significativamente."

(WEBER,1846)

Em outras palavras, é nesse instante, no qual a velocidade relativa é nula, que a aceleração relativa é responsável por desviar a força elétrica da força eletrostática. Weber propõe, portanto, uma modificação no termo obtido anteriormente, passando a incluir um termo dependente da aceleração relativa entre as massas elétricas

$$\left(1 - a^2 \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + b \frac{d^2r}{dt^2} \right) \quad (4.21)$$

com a constante b a determinar. A expressão para a força elétrica passa a ser, portanto:

$$-\frac{ee'}{r^2} \left(1 - a^2 \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + b \frac{d^2r}{dt^2} \right) \quad (4.22)$$

Para o caso particular ilustrado acima, é possível encontrar uma expressão simples para a aceleração relativa. Seja R a distância entre os dois

elementos de corrente. Em um intervalo de tempo t , as massas elétricas se distanciam de uma distância $t(u - u')$. A distância entre as massas é, portanto,

$$r^2 = R^2 + (u - u')^2 t^2 \quad (4.23)$$

Derivando implicitamente a expressão em função do tempo e considerando que as velocidades das massas são constantes, obtém-se

$$\frac{dr}{dt} = \frac{(u - u')}{r} t \quad (4.24)$$

Tomando, novamente, a derivada implícita da expressão em função do tempo, encontra-se

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{(u - u')}{r} \left(1 - \frac{t}{r} \cdot \frac{dr}{dt} \right) \quad (4.25)$$

Para obter a expressão relativa à interação entre massas elétricas que se movem em sentidos opostos, basta alterar o sinal de u' para $-u'$, obtendo-se, portanto,

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{(u + u')}{r} \left(1 - \frac{t}{r} \cdot \frac{dr}{dt} \right) \quad (4.26)$$

No caso de interesse, no qual a velocidade relativa é nula,

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{(u - u')}{r} \quad (4.27)$$

É possível, agora, proceder de forma análoga ao caso anterior, calculando a soma das forças entre as massas iguais e as massas diferentes. A soma das forças entre as massas elétricas iguais, e que, portanto, se movem no mesmo sentido, é

$$-2 \frac{ee'}{r^2} \left(1 + \frac{b}{r} (u - u')^2 \right), \quad (4.28)$$

enquanto a soma para as massas elétricas diferentes, que, portanto, se movem em sentidos opostos, é

$$+2 \frac{ee'}{r^2} \left(1 + \frac{b}{r} (u + u')^2 \right) \quad (4.29)$$

A resultante entre todas as massas elétricas é a soma das expressões acima, ou seja:

$$2 \frac{ee'}{r^2} \frac{b}{r} \left((u + u')^2 - (u - u')^2 \right). \quad (4.30)$$

Expandindo e simplificando os termos, obtém-se, finalmente, que a força entre os portadores de corrente deve ser

$$8 \frac{ee'}{r^2} \frac{b}{r} uu'. \quad (4.31)$$

Assim como no caso anterior, os sinais das velocidades indicam os sentidos das correntes: sentidos iguais de corrente correspondem a sinais iguais das velocidades, mantendo a expressão positiva e indicando, conforme esperado, uma atração; sentidos opostos de corrente correspondem a sinais opostos das

velocidades, tornando a expressão negativa e indicando, conforme esperado, uma repulsão.

A expressão para a mesma força obtida através da lei de força de Ampère é

$$\frac{ii'dsds'}{r^2} . \quad (4.32)$$

Weber nota que essa expressão é precisamente, em módulo, o dobro da expressão obtida pela lei de Ampère para o primeiro fato:

$$-\frac{ii'dsds'}{2r^2} . \quad (4.33)$$

O mesmo não vale para as expressões obtidas pelo desenvolvimento de Weber, que possuem um fator multiplicativo de 8:

$$\text{do primeiro fato: } -8a^2 \frac{ee'}{r^2} uu' , \quad (4.34)$$

$$\text{do segundo fato: } 8 \frac{ee'}{r^2} \frac{b}{r} uu' . \quad (4.35)$$

Para que o fator nesse segundo fato seja o dobro do fator do primeiro fato, assim como prevê a lei de Ampère, e, também, para eliminar o r adicional no denominador e fazer surgir o a^2 que não está presente neste segundo fato, Weber conclui que a constante b deve ser

$$b = 2ra^2 . \quad (4.36)$$

Substituindo esse valor encontrado para a constante na expressão para a força elétrica universal, obtém-se, por fim,

$$-\frac{ee'}{r^2} \left(1 - a^2 \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + 2a^2 \cdot r \frac{d^2r}{dt^2} \right). \quad (4.37)$$

Essa fórmula já é capaz, por si só, de descrever o primeiro e o segundo caso, assim como o caso eletrostático. Logo, pode-se dizer que, com a obtenção de tal expressão, teria sido feita a unificação entre a eletrostática de Coulomb e a eletrodinâmica de Ampère, com a expressão da lei de força de Ampère sendo apenas um caso particular desta lei mais geral. Para garantir que essa nova força desenvolvida por Weber seria capaz de explicar todos os fenômenos elétricos conhecidos até o momento de sua criação, bastaria apenas investigar sua capacidade de descrever a indução de Volta observada por Faraday.

4.5 - Indução de corrente elétrica

O terceiro fato apontado por Weber considera um portador de corrente colinear a um elemento de fio, ou seja, dois elementos de fio colineares, com a diferença de que, no interior do primeiro, as massas elétricas encontram-se em movimento – portanto, há corrente – enquanto no interior do segundo as massas elétricas encontram-se em repouso. Os experimentos de Faraday demonstraram que, com o aumento da corrente elétrica no portador de corrente, surge uma corrente induzida de mesmo sentido no elemento de fio, ao passo que com a diminuição da corrente no portador há indução de corrente em sentido oposto no elemento de fio.

Diferentemente dos anteriores, o terceiro fato apontado por Weber não encontra explicação na lei de força Ampère. Weber explica:

"O terceiro fato mencionado acima é, em última análise, baseado, ao contrário dos dois anteriores, em forças que agem diretamente nas massas elétricas em si e as movem no seu portador, buscando separar massas diferentes; isto é, em forças eletromotrices, que são exercidas por massas elétricas em movimento dentro de um condutor galvânico sobre a eletricidade em repouso. " (WEBER, 1846)

Ou seja, enquanto os outros dois fatos podem ser reduzidos ao efeito das forças agindo sobre os portadores de corrente ponderáveis, conforme é feito na lei de força de Ampère, este terceiro fato é baseado nas forças que agem diretamente nas massas elétricas dentro de seus portadores. Uma outra diferença entre este fato e os anteriores é que, enquanto nos outros fatos as forças surgem da interação entre massas elétricas em movimento, neste fato a força surge da interação entre massas elétricas em movimento e massas elétricas em repouso, de tal modo que as primeiras põem as segundas em movimento.

Conforme o trecho acima, Weber supõe a existência de forças que buscam separar as massas diferentes, ou seja, separar as massas positivas das negativas, e chama tais forças de eletromotrices. Apesar de tratar-se do mesmo nome utilizado por Volta e outros autores, há uma diferença significativa na percepção de Weber sobre a origem da força eletromotriz. Enquanto para Volta a força eletromotriz era algo fornecido pela pilha para mover fluidos elétricos (VARNEY, 1980), para Weber essa força é resultado da

interação entre as próprias massas elétricas dentro do condutor, propondo, portanto, uma definição mais generalizada de força eletromotriz.

Weber nota que o surgimento de forças eletromotrices nas massas em repouso não pode se dever à interação eletrostática, pois, se fosse esse o caso, novamente, as resultantes nas massas elétricas seriam nulas:

"Entretanto, essas forças não são apenas não determinadas pela lei eletrostática, mas também não são determinadas pela lei eletrodinâmica de Ampère, pois esta última se relaciona apenas às forças transmitidas ao portador de corrente e a primeira, mesmo que aplicável, resultaria em um valor de força eletromotriz igual a 0. Portanto, essas forças constituem uma classe essencialmente nova, da qual a descoberta de Faraday nos trouxe o primeiro conhecimento."

(WEBER,1846)

Para que haja uma separação entre as massas positivas e negativas, as forças agindo sobre eles devem, necessariamente, ser diferentes, conforme afirma Weber:

"Agora, a partir do fato de que uma corrente é produzida no elemento onde anteriormente não havia corrente, devemos concluir que outra força, diferente da que atua sobre a massa elétrica negativa, deve estar atuando sobre a massa elétrica positiva nesse elemento, na direção desta última, porque a massa elétrica negativa só pode adquirir esse movimento oposto por meio de tal diferença nas forças que atuam sobre ela, e é esse movimento oposto que essencialmente constitui a corrente que se manifesta. Expressamos, portanto, o fato inicialmente da seguinte maneira." (WEBER,1846)

Uma vez feitas essas considerações, Weber expressa o terceiro fato de outra forma:

"Assim, expressamos o fato inicialmente da seguinte maneira:

A soma das duas forças exercidas pelas massas elétricas positiva e negativa no elemento de corrente sobre a massa positiva em repouso no elemento sem corrente, na direção deste último, é diferente da soma das duas forças que essas massas [positiva e negativa em movimento] exercem [de] dentro do elemento de corrente citado sobre a massa negativa em repouso no elemento sem corrente, na direção desta última; no entanto, a diferença das duas somas, ou seja, a própria força eletromotriz, depende da mudança de velocidade das duas massas elétricas no elemento de corrente dado e aumenta ou diminui e desaparece com essa mudança." (WEBER,1846)

De outra forma, a força sofrida pela massa negativa em repouso, em decorrência do movimento das massas elétricas no interior do primeiro elemento, deve ser diferente da força sofrida pela massa positiva em repouso em decorrência do mesmo movimento. A diferença entre essas duas forças é a força eletromotriz.

Sendo assim, a força elétrica universal deve diferir da força eletrostática por meio de termos dependentes dos movimentos das massas elétricas. Tais adições à lei eletrostática já foram feitas nos fatos anteriores. Weber conclui que deve ser possível explicar esse terceiro fato com os resultados já obtidos anteriormente:

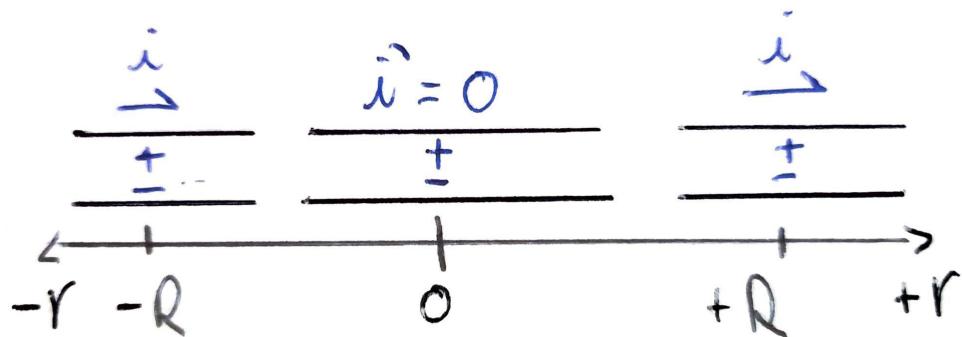
"Portanto, somos levados por este terceiro fato, também, a acrescentar às forças elétricas determinadas pela lei eletrostática um suplemento

dependente de seu movimento, e a questão é apenas se isso justifica exatamente o mesmo suplemento estabelecido com base nos dois primeiros fatos. Este terceiro fato, portanto, proporciona um critério para testar os resultados já obtidos e é especialmente adequado para sua rejeição ou sua confirmação mais sólida." (WEBER, 1846)

O próximo passo é, portanto, estudar esse caso particular à luz da lei obtida até o momento.

Para estudar o movimento relativo entre as massas elétricas em movimento e as massas elétricas em repouso, será adotado um sistema de coordenadas segundo a figura 9.

Figura 9 - Sistema de coordenadas com o elemento de fio sem corrente estando na origem. A posição de um portador de corrente à esquerda assume valor negativo e à direita assume valor positivo.



Fonte: de autoria própria.

Considerando as massas em repouso e' e $-e'$ como estando na origem e a velocidade absoluta das cargas no portador de corrente como u , a posição de uma carga positiva em relação à do elemento de fio é

$$r = R + \int_0^t u dt \quad . \quad (4.38)$$

A posição de uma carga positiva à direita do elemento de fio é

$$r = -R + \int_0^t u dt \quad . \quad (4.39)$$

Diferenciando-se ambas as expressões, obtém-se o mesmo resultado para a velocidade relativa entre as massas elétricas:

$$\frac{dr}{dt} = u \quad , \quad (4.40)$$

onde u é uma função do tempo. Tomando a derivada temporal na expressão acima, encontra-se uma expressão para a aceleração relativa:

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{du}{dt} \quad . \quad (4.41)$$

As expressões para a posição da carga negativa podem ser obtidas trocando o sinal de u .

Denotando como u_0 e du_0 os valores de u e du no instante $t = 0$ e substituindo as expressões encontradas na lei de força elétrica proposta, obtém-se para a força entre $+e'$ e $+e$:

$$-\frac{ee'}{r^2} \left(1 - a^2 \cdot u_0^2 + 2a^2 \cdot r \frac{du_0}{dt} \right) . \quad (4.42)$$

Para a força entre $+e'$ e $-e$:

$$\frac{ee'}{r^2} \left(1 - a^2 \cdot u_0^2 - 2a^2 \cdot r \frac{du_0}{dt} \right) . \quad (4.43)$$

A força resultante sobre $+e'$ é, portanto,

$$-4 \frac{ee'}{r} a^2 \frac{du_0}{dt} . \quad (4.44)$$

A força entre $-e'$ e $+e$ é:

$$\frac{ee'}{r^2} \left(1 - a^2 \cdot u_0^2 + 2a^2 \cdot r \frac{du_0}{dt} \right) , \quad (4.45)$$

enquanto a força entre $-e'$ e $-e$ é

$$-\frac{ee'}{r^2} \left(1 - a^2 \cdot u_0^2 - 2a^2 \cdot r \frac{du_0}{dt} \right) . \quad (4.46)$$

Assim, a resultante sobre $-e'$ é

$$4 \frac{ee'}{r} a^2 \frac{du_0}{dt} . \quad (4.47)$$

Weber continua: "*a diferença entre elas [as somas das forças sobre as massas positiva e negativa] resulta na força eletromotriz, que busca separar as massas positivas e negativas no elemento sem corrente.*" (WEBER,1984).

Tomando a diferença entre a força sobre a massa positiva e a força sobre a massa negativa obtém-se

$$-8 \frac{ee'}{r} a^2 \frac{du_0}{dt} . \quad (4.48)$$

4.6 - Recepção pela comunidade científica

Na notação atual e no Sistema Internacional de unidades, a força elétrica universal de Weber é escrita como:

$$\mathbf{F} = \frac{q_1 q_2 \hat{\mathbf{r}}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left(1 - \frac{\dot{r}^2}{2c^2} + \frac{r\ddot{r}}{c^2} \right). \quad (4.49)$$

onde q_1 e q_2 são as cargas elétricas dos portadores de carga, ϵ_0 é a permissividade elétrica do vácuo e C é a velocidade da luz no vácuo.

Em 1848, Weber propõe uma expressão para o potencial elétrico partindo de sua lei de força. Na notação atual:

$$V = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r} \left(1 - \frac{\dot{r}^2}{2c^2} \right). \quad (4.50)$$

Observe-se que a expressão da força corresponde à derivada do potencial acima.

Os resultados propostos por Weber causaram reações diversas na comunidade científica. Enquanto alguns acadêmicos como Maxwell e Hermann Von Helmholtz criticaram a teoria de Weber, outros a acolheram e defenderam (WOODRUFF,1962). Para muitos físicos da época, a ideia da existência de uma força central à distância que fosse dependente das velocidades e acelerações gerava muita resistência. Maxwell fala explicitamente que esse fato o motivou a buscar uma teoria própria:

"As dificuldades mecânicas [...] que estão envolvidas na suposição de partículas agindo à distância com forças que dependem de suas velocidades são tais que me impedem de considerar essa teoria como definitiva, embora possa ter sido, e ainda possa ser, útil para conduzir

à coordenação dos fenômenos. Portanto, preferi buscar uma explicação dos fatos em outra direção, supondo que eles são produzidos por ações que ocorrem no meio ambiente, além dos corpos excitados, e tentando explicar a ação entre corpos distantes sem assumir a existência de forças agindo diretamente em distâncias sensíveis." (MAXWELL,1865)

Em 1865, Maxwell publica seu trabalho *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, onde são apresentadas pela primeira vez as equações hoje conhecidas como Equações de Maxwell, que relacionavam entidades anteriormente propostas por ele, o campo elétrico e o campo magnético. A abordagem de Maxwell trata ambos os campos como perturbações num fluido que permearia todo o espaço: o éter. Ou seja, Maxwell não se baseia de nenhuma forma em ações à distância.

Helmholtz por sua vez resistia à teoria de Weber pois acreditava que forças dependentes da velocidade violariam a conservação de energia, conforme demonstrou em 1847. Contudo, no ano seguinte, Weber mostrou que o resultado de Helmholtz só era válido para forças dependentes da velocidade mas independentes da aceleração. (WOODRUFF,1968).

Novas objeções foram feitas por Helmholtz e novas defesas feitas por Weber durante a maior parte da década de 1870. Ao longo desses anos, Helmholtz teve contato com a teoria de Maxwell e, apesar de defendê-la, ainda a considerava insatisfatória, pois achava que a ideia do éter seria muito difícil de verificar experimentalmente (WOODRUFF,1968).

Helmholtz decidiu, então, buscar uma teoria própria, que, além de não apresentar os problemas que ele tinha com a lei de Weber, não dependia

necessariamente do éter. Por meio de seus trabalhos, Helmholtz mostrou que, partindo da lei de Weber, em um caso limite, era possível chegar às equações de Maxwell.

Nos dias atuais sabe-se que, ao se abandonarem as hipóteses de Weber e utilizando-se conhecimentos mais modernos, a lei de Weber é capaz de explicar uma grande quantidade de fenômenos eletromagnéticos. Por exemplo, O livro *Eletrodinâmica de Weber: Teoria, Aplicações e Exercícios* de Assis (1995)⁴ apresenta uma série de aplicações da lei de Weber a fenômenos eletromagnéticos, mostrando que é possível desenvolver uma teoria eletromagnética parcial nos padrões atuais baseada na ação à distância e em potenciais simples, sem o uso de campos.

⁴ Disponível em <<https://www.ifi.unicamp.br/~assis/livros.htm>>. Acesso em 28 jul. 2023

CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentadas algumas das principais teorias acerca de efeitos elétricos e magnéticos dos séculos XVIII e XIX, partindo das ideias fundamentais que levaram ao desenvolvimento da eletrostática e chegando ao desenvolvimento de uma lei geral da eletrodinâmica baseada na ação à distância.

O presente trabalho apresenta não só uma compilação de contribuições de diversos cientistas à física, podendo servir como ponto de partida para outras pesquisas mais profundas, mas também uma análise e interpretação histórica dos pensamentos desses mesmos cientistas.

Foram mostradas as primeiras teorias para as cargas elétricas, que as concebiam como fluidos imponderáveis, concebidas por Du Fay e Franklin. Partindo de uma concepção similar e influenciado pela mecânica newtoniana, Coulomb desenvolveu uma lei para a força eletrostática como ação à distância

Mostramos as primeiras noções de corrente elétrica a partir da pilha de Volta, a concepção baseada em campos de Ørsted para os fenômenos elétricos e magnéticos, a proposta unificadora de Ampère e o desenvolvimento de sua lei de força, baseada também em ação à distância.

Foram apresentados as hipóteses e argumentos feitos por Weber para o desenvolvimento de sua lei eletrodinâmica a partir das ideias fundamentais de seu colega Fechner. Segundo ele, o fluido elétrico era composto por partículas imponderáveis fundamentais que interagiam à distância, gerando todos os

fenômenos eletromagnéticos conhecidos na época: a eletrostática, a força entre correntes elétricas e a indução de correntes elétricas.

A teoria de Weber, por meio dos esforços de outros cientistas, como Helmholtz, tornou-se capaz de, com uma abordagem de ação à distância explicar grande parte dos fenômenos eletromagnéticos que atualmente são normalmente explicados com uma abordagem de campos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-KHALILI, J. The birth of the electric machines: a commentary on Faraday (1832) “Experimental researches in electricity”. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences**, v. 373, n. 2039, p. 20140208, 13 abr. 2015.

AMPÈRE, A.-M. [Correspondência]. Destinatário: Jean-Jacques Ampère. 25 set. 1820. Carta L590.

AMPÈRE, A.-M. Mémoire présenté à l'Académie royale des Sciences, le 2 octobre 1820, où se trouve compris le résumé de ce qui avait été lu à la même Académie les 18 et 25 septembre 1820, sur les effets des courants électriques. **Annales de Chimie et de Physique**, 15, 59-76, 1820.

AMPÈRE, A.-M. Notice sur les nouvelles expérimentations électro-magnétiques faites par différents physiciens, depuis le mois de mars 1821, lue dans la séance publique de l'académie royale des sciences, le 8 avril 1822. **Journal de Physique, de Chimie, d'Histoire Naturelle et des Arts**, 94, 61–66, 1822.

AMPÈRE, A.-M. Expériences relatives à de nouveaux phénomènes électrodynamiques. **Annales de Chimie et de Physique**, 20, 60–74, 1822.

AMPÈRE, A.-M. **Théorie des Phénomènes Électro-dynamiques, Uniquement Déduite de l'Expérience**. Paris: Mequignon-Marvis, 1826

AMPÈRE, A.-M. **Recueil d'Observations Électro-dynamiques**. Paris: Crochard, 1822

ASSIS, A.K.T. **Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade**. Montreal: Apeiron, 2010.

ASSIS, A.K.T. **Eletrodinâmica de Weber**: Teoria, Aplicações e Exercícios. 2.ed. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 2015

ASSIS, A.K.T; CHAIB, J.P.M.C. **Ampère's Electrodynamics – Analysis of the Meaning and Evolution of Ampère's Force between Current Elements, together with a Complete Translation of His Masterpiece: Theory of Electrodynamic Phenomena, Uniquely Deduced from Experience**. Montreal: Apeiron, 2015

ASSIS, A.K.T. **Os Fundamentos Experimentais e Históricos da Eletricidade**. Montreal: Apeiron, 2019. v 2.

ASSIS, A.K.T. **Tradução Comentada das Principais Obras de Coulomb sobre Eletricidade e Magnetismo**. Montreal: Apeiron, 2022.

ATHERTON, T. A history of Ohm's law. **Electronics and Power**, v. 32, n. 6, p. 467, 1986.

BLONDEL, C; WOLFF, B. **La proportionnalité de la force électrique aux charges**: définition ou loi expérimentale? Disponível em <www.ampere.cnrs.fr/parcourspedagogique>. Acesso em: jul. 2024.

BOSS, S. L. B.; CALUZI, J. J. Os conceitos de eletricidade vítreia e eletricidade resinosa segundo Du Fay. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 29, n. 4, p. 635–644, 2007.

BROWN, T. M. The Electric Current in Early Nineteenth-Century French Physics. **Historical Studies in the Physical Sciences**, v. 1, p. 61–103, 1 jan. 1969.

CHAIB, J.P.M.C; ASSIS, A.K.T; .Sobre os efeitos das correntes elétricas (segunda parte) – Tradução comentada da primeira obra de Ampère sobre eletrodinâmica, **Revista Brasileira de História da Ciência**, Vol. 2, pp. 118-145, 2009.

DU FAY,C.F.C. [Correspondência]. **Philosophical Transactions of The Royal Society** 38, 258, 1733.

COULOMB, C. A. Premier mémoire sur l'électricité et le magnétisme: Construction et usage d'une balance électrique, fondée sur la propriété qu'ont les fils de métal, d'avoir une force de réaction de torsion proportionnelle à l'angle de torsion. Détermination expérimentale de la loi suivant laquelle les éléments des corps électrisés du même genre d'électricité, se repoussent mutuellement. **Mémoires de l'Académie royale des Sciences de l'Institut de France**, 88, 569-577, 1785.

COULOMB, C. A. Second mémoire sur l'électricité et le magnétisme, où l'on détermine, suivant quelles lois de fluide magnétique, ainsi que le fluide électrique, agissent, soit par répulsion, soit par attraction. **Mémoires de l'Académie royale des Sciences de l'Institut de France**, 88, 578-611, 1785

COULOMB, C. A. Recherches théoriques et expérimentales sur la force de torsion, et sur l'élasticité des fils de métal: applications de cette théorie à l'emploi des métaux dans les arts et dans différentes expériences de physique: construction de différentes balances de torsion, pour mesurer les plus petits degrés de force. Observation sur les lois de l'élasticité et de la cohérence. **Mémoires de l'Académie royale des Sciences**, 87, 229-269, 1787.

COULOMB, C. A. Sixième mémoire sur l'électricité. Suite des recherches sur la distribution du fluide électrique entre plusieurs corps: détermination de la densité électrique dans les différents points de la surface de ces corps. **Mémoires de l'Académie royale des Sciences**, 91:617–705, 1791

FRANKLIN, B. **Experiments and observations on electricity.** 1751.

GEDDES, L. A.; HOFF, H. E. The discovery of bioelectricity and current electricity The Galvani-Volta controversy. **IEEE Spectrum**, v. 8, n. 12, p. 38–46, dez. 1971.

GILLMOR, C.S. **Coulomb and the evolution of physics and engineering in eighteenth-century France.** Princeton, N.J.: Princeton University Press, 1972.

OERSTED, H. C. Experiments on the effect of a current of electricity on the magnetic needle. **Annals of Philosophy**, 16:273–277, 1820.

JUNGNICKEL, C.; MCCORMMACH, R. **Intellectual Mastery of Nature.** Theoretical Physics from Ohm to Einstein, Volume 2. [s.l.] University of Chicago Press, 1990.

MARCHANT, W.H. **Wireless Telegraphy**:A Handbook for the Use of Operators and Students. New York: Whittaker, 1914.

MARTIN, T.H. **La foudre, l'électricité et la magnétisme chez les anciens.** Paris: Didier, 1866

MAXWELL, J. C. On Faraday's Lines of Force. **Transactions of the Cambridge Philosophical Society**, 1855

MAXWELL, J.C. **A Treatise of Electricity and Magnetism.** Oxford: Clarendon Press, 1873.

REICH, K. Tradução: Karen Jelved; Andres D. Jackson. **The Travel Letters of H. C. Ørsted**, n. 1, p. 120–122, 1 jan. 2015.

SANFORD, F. Origin of the Electrical Fluid Theories. **The Scientific Monthly**, v. 13, n. 5, p. 448–459, 1921.

VARNEY, R. N.; FISHER, L. H. Electromotive force: Volta's forgotten concept. **American Journal of Physics**, v. 48, n. 5, p. 405–408, maio 1980.

VOLTA, A. On the electricity excited by the mere contact of conducting substances of different kinds. [Correspondência] Destinatários: Banks, S.J; Bart. K. B. P. R. S. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London**, v. 1, p. 27–29, 31 dez. 1832.

WOODRUFF, A. E. Action at a Distance in Nineteenth Century Electrodynamics. **Isis**, v. 53, n. 4, p. 439–459, 1 dez. 1962.

WOODRUFF, A. E. The Contributions of Hermann von Helmholtz to Electrodynamics. **Isis**, v. 59, n. 3, p. 300–311, out. 1968.

WEBER, W. E. Werke. **Annalen der Physik und Chemie**, 73:193-240, 1848.
v.3. p.215-254;

WEBER, W. E. **Werke**. André Koch Torres Assis. Tradução: Susan P Johnson.
Leipzig: Prince Jablonowski Society, 2007. v. 3p. 211–378